


TRAITÉ D'ÉLECTRICITÉ

ET

DE MAGNÉTISME;

AVEC LEURS APPLICATIONS
AUX SCIENCES PHYSIQUES, AUX ARTS ET A L'INDUSTRIE,

PAR

MM. BECQUEREL,

DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES DE L'INSTITUT DE FRANCE,
PROFESSEUR-ADMINISTRATEUR AU MUSÉUM D'HISTOIRE NATURELLE, ETC.

ET

EDMOND BECQUEREL,

PROFESSEUR AU CONSERVATOIRE DES ARTS ET MÉTIERS,
AIDE-NATURALISTE AU MUSÉUM D'HISTOIRE NATURELLE, ETC.

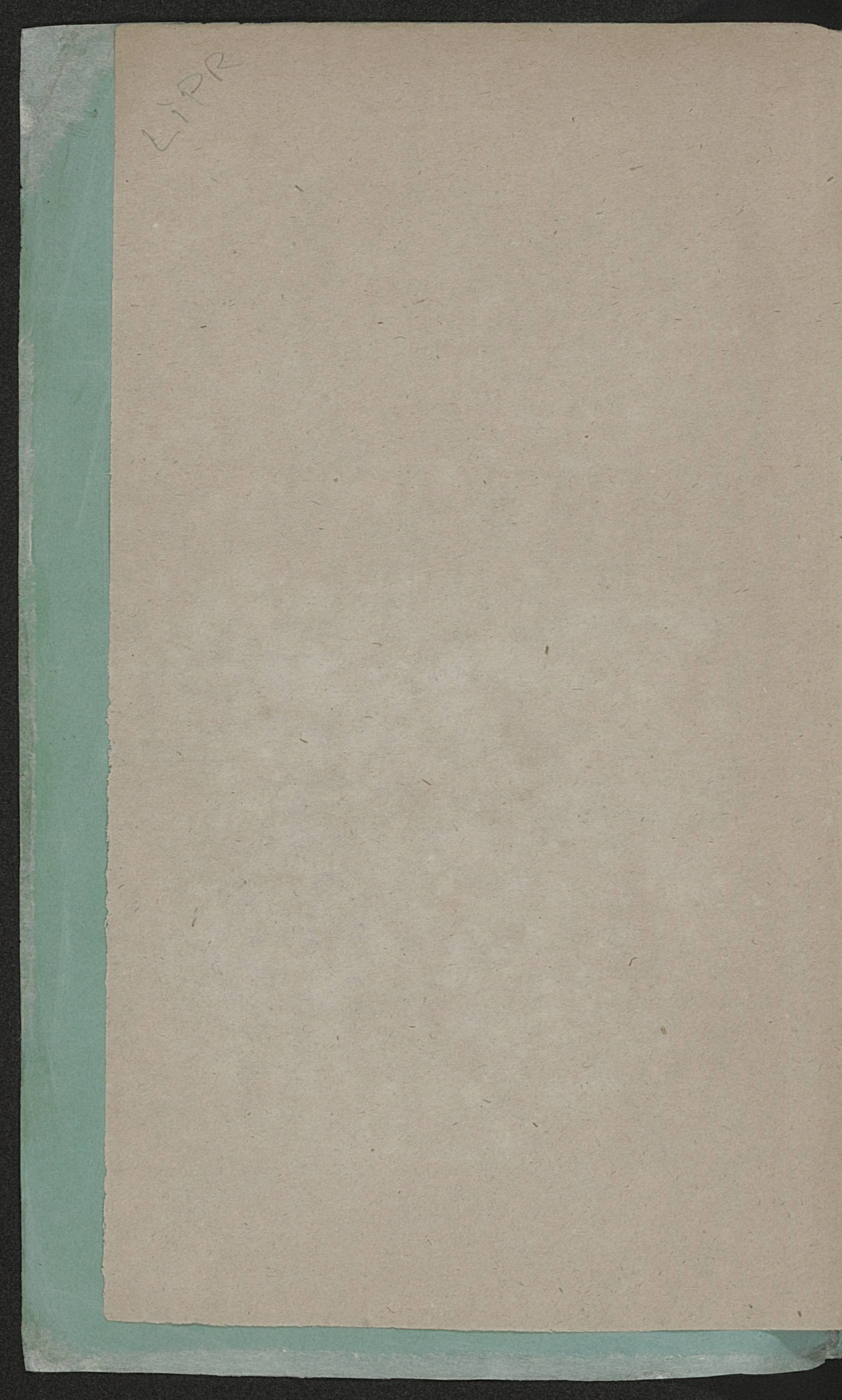
TOME PREMIER.

ÉLECTRICITÉ. — PRINCIPES GÉNÉRAUX.

PARIS,
LIBRAIRIE DE FIRMIN DIDOT FRÈRES,
IMPRIMEURS DE L'INSTITUT, RUE JACOB, 56.

1855.



TRAITÉ
D'ÉLECTRICITÉ
ET DE MAGNÉTISME.

TOME I.

Paris. — Typographie de Firmin Didot Frères, rue Jacob, 56.

TRAITÉ
D'ÉLECTRICITÉ
ET
DE MAGNÉTISME.

LEURS APPLICATIONS

AUX SCIENCES PHYSIQUES, AUX ARTS ET A L'INDUSTRIE,

PAR MM.

BECQUEREL,

DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES DE L'INSTITUT DE FRANCE,
PROFESSEUR-ADMINISTRATEUR AU MUSÉUM D'HISTOIRE NATURELLE, ETC.,

ET

EDMOND BECQUEREL,

PROFESSEUR AU CONSERVATOIRE IMPÉRIAL DES ARTS ET MÉTIERS,
AIDE-NATURALISTE AU MUSÉUM D'HISTOIRE NATURELLE, ETC.

TOME PREMIER.

ELECTRICITÉ. — PRINCIPES GÉNÉRAUX.

PARIS,

LIBRAIRIE DE FIRMIN DIDOT FRÈRES,

IMPRIMEURS DE L'INSTITUT,

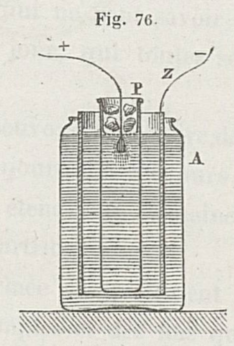
RUE JACOB, 56.

1855.

ERRATA.

Page 11, ligne 11, *au lieu de*, levier CD, *lisez :* levier CB.
Page 34, figure 24 ter, mettre la lettre D au plateau de gauche.
Page 39, ligne 3, *au lieu de*, placet-on, *lisez :* place-t-on.
Page 90, ligne 27, *au lieu de*, entre les godets G et R, *lisez :* entre les godets Q et R.
Page 107 en note, *au lieu de*, le gutta-percha, *lisez :* la gutta-percha.
Page 143, ligne 1, *au lieu de*, a une travere AA, *lisez :* a une traverse AA.
Page 174, ligne 23, *au lieu de*, abstraction de leur conductibilité, *lisez :* abstraction faite de leur conductibilité.
Page 229, à la figure 76, substituer celle-ci corrigée :

Fig. 76.



Page 353. La figure 104 bis n'ayant été vue par les auteurs qu'après le tirage, et ne rendant pas l'effet décrit dans le texte, et surtout les stratifications horizontales, on donnera avec la figure de l'appareil d'induction, dans l'*électro-magnétisme*, une nouvelle figure pour représenter l'effet lumineux observé dans les gaz raréfiés.

INTRODUCTION.

Chaque branche de la physique a eu ses phases de gloire, ses temps de repos et ses recrudescences, qui tour à tour en ont reculé les limites. Depuis un demi-siècle, l'électricité est en voie de progrès, et nul ne peut savoir où s'arrêteront ses découvertes de chaque jour, qui toutes sont empreintes du grand nom de Volta.

En Europe, et nous pouvons même dire dans toutes les parties du monde, il y a aujourd'hui concours d'émulation entre les physiciens pour en étendre le domaine, sous le rapport théorique, industriel et artistique.

Une science n'est formée complétement qu'autant qu'elle possède des principes simples et des lois qui permettent d'y rattacher les faits nouveaux. L'électricité, sous ce rapport, n'a pas encore atteint son apogée : quelques-unes des parties dont elle se compose, particulièrement la distribution de l'électricité à la surface des corps, les phénomènes électro-dynamiques, la conductibilité électrique, sont soumis à des lois plus ou moins simples, qui permettent d'en déduire par le calcul les principales conséquences, lesquelles sont confirmées par l'expérience. Mais il en est autrement des autres parties : on

peut citer notamment l'électro-chimie, qui rattache la chimie à la physique par de nouveaux liens ; elle embrasse une foule de phénomènes complexes dont on ne peut pas toujours donner une explication complétement satisfaisante. Les phénomènes calorifiques de l'électricité, en ce qui concerne particulièrement leur production, phénomènes qui dépendent des rapports non connus existant entre la chaleur et l'électricité, sont également dans ce cas. Il en est encore de même de l'électro-magnétisme. On se trouve ainsi dans la nécessité de multiplier les expériences, dans l'espoir de trouver de nouveaux faits pouvant conduire à la découverte de principes fondamentaux. Tels sont les motifs qui ont engagé l'un de nous à publier, il y a une quinzaine d'années, un traité d'électricité et de magnétisme présentant un tableau aussi complet que possible de l'état de nos connaissances dans ces deux branches de la physique.

Depuis cette publication, la science a fait de nouveaux progrès, surtout quelques parties, telles que l'électro-chimie, l'électro-magnétisme et les applications de ces deux branches de l'électricité.

Un traité d'électricité sous une forme plus didactique que ce dernier, mais non aussi complet, a paru il y a peu de temps ; il est dû à M. de la Rive, un des savants les plus distingués de l'Europe, et dont les découvertes et les vues ingénieuses ont le plus contribué aux progrès de l'électricité. Cet ouvrage est rédigé avec clarté, précision et un esprit d'impartialité et de bienveillance qu'on ne rencontre pas toujours dans les ouvrages de ce genre.

Nous citerons encore d'autres ouvrages sur l'électricité, recommandables à divers titres, et qui ont été publiés depuis le traité dont nous venons de parler : savoir, notamment le *Traité*

des phénomènes électro-physiologiques des animaux, par M. Matteucci, ouvrage rempli de faits nouveaux qui lui appartiennent; un *Résumé des leçons sur l'électro-magnétisme*, par le même auteur; le *Traité du magnétisme et de l'électricité*, de M. Zantedeschi; l'*Exposé des applications de l'électricité*, par M. Dumoncel; le *Traité de télégraphie électrique*, de M. Breguet; celui de M. l'abbé Moigno, etc.

Dans les cours de physique appliquée dont nous sommes chargés, l'un au Muséum d'histoire naturelle, et l'autre au Conservatoire des arts et métiers, nous exposons avec de grands développements, chacun dans notre spécialité, toutes les applications de l'électricité et du magnétisme à la chimie, aux sciences physiques, aux arts et à l'industrie, en les renfermant pour ainsi dire dans un même cadre, à raison de nos relations fréquentes et de la conformité de nos vues sur cette partie de nos connaissances. D'après le désir qui nous a été témoigné de voir paraître le résumé de nos leçons, nous avons pensé qu'il serait plus utile de réunir en un seul ouvrage les différents sujets traités dans les parties des cours du muséum et du conservatoire relatives à l'électricité; c'est ce motif qui nous a engagé à faire paraître un nouveau traité d'électricité et de magnétisme avec les principales applications qui ont été imaginées jusqu'ici. Ce traité, dans lequel se trouvent résumés les travaux les plus récents, est donc tout à fait distinct du *Traité d'électricité et de magnétisme*, en sept volumes, qui est un tableau complet et détaillé de l'état de nos connaissances dans cette partie de la physique à l'époque où il parut.

Ce nouvel ouvrage est divisé en douze livres, formant trois volumes; voici quelles en sont les principales subdivisions :

Ier VOLUME.

ÉLECTRICITÉ. PRINCIPES GÉNÉRAUX.

IIe VOLUME.

ÉLECTRO-CHIMIE.

IIIe VOLUME.

MAGNÉTISME ET ÉLECTRO-MAGNÉTISME.

Nous avons cru devoir exposer avec de grands développements les recherches relatives au traitement électro-chimique des minerais de plomb, d'argent, de cuivre, etc. Ces recherches ont occupé l'un de nous (Becquerel) pendant une dizaine d'années; elles ont été faites sur plus de 10,000 kilogrammes de

minerai venus de différents points du globe, et particulièrement du Mexique, du Pérou, de la Colombie, de l'Altaï, etc. Elles ont porté, 1° sur la préparation à faire subir aux minerais pour transformer l'argent et le plomb en composés solubles dans l'eau salée au maximum de saturation ; 2° sur la séparation des métaux de leur dissolution les uns des autres au moyen de l'action chimique de l'électricité; 3° sur un grand nombre de questions accessoires qui intéressent l'électro-chimie en général, et la métallurgie des métaux précieux en particulier.

Les minerais du Mexique, vu leur abondance et leurs variétés ainsi que leur mode de traitement, ont attiré vivement l'attention, car il y avait nécessité d'établir une comparaison entre les modes de traitement en usage et celui qui est fondé sur l'action chimique de l'électricité.

On s'est appuyé, pour établir cette comparaison, sur les documents consignés dans l'intéressant ouvrage de M. Duport Saint-Clair, ayant pour titre : *de la Production des métaux précieux au Mexique;* Paris, 1843 (Didot). Un grand nombre de causes influent sur la production des métaux précieux dans cette contrée, 1° le mode d'exploitation en usage; 2° les moyens insuffisants employés pour l'épuisement des eaux, la vapeur n'ayant été appliquée jusqu'ici que dans très-peu d'établissements, à cause de la rareté de la houille, qui n'a encore été trouvée que sur les côtes, particulièrement près de Tampico. Les gîtes les plus importants, tels que Sombrerete, Zacatecas, etc., sur une ligne de 160 kilomètres, ne reçoivent leur bois que de forêts de chêne vert mêlé de pin, et dont l'étendue est extrêmement limitée; forêts dont la destruction progressive finirait par porter un coup fatal à l'exploitation minière, si l'administration mexicaine n'intervenait pas, car le bois est nécessaire non-seu-

lement pour toute exploitation métallurgique, mais encore pour le boisage des travaux souterrains ; 3° la nécessité où l'on est de tirer en presque totalité de l'étranger le fer, dont la dépense est importante ; 4° le prix élevé de la poudre ; 5° la sortie des capitaux du Mexique depuis 1820 à 1830, et l'intérêt très-élevé de l'argent, qui ont ralenti l'exploitation des mines ; 6° enfin les non-succès des compagnies anglaises qui, depuis l'indépendance, ont voulu exploiter les principales mines.

Le traitement par la fonte est trop dispendieux au Mexique, à cause de la rareté du combustible, pour qu'on en fasse usage dans les grands établissements métallurgiques. Néanmoins ce traitement, dans les localités où il est pratiqué, peut recevoir de grandes améliorations, soit en apportant des perfectionnements dans la construction des fourneaux, soit dans le meilleur emploi du combustible, dont le prix est élevé, soit dans le choix de bons fondants. Le traitement par le mercure étant moins dispendieux que le précédent, a eu nécessairement la préférence ; aussi pense-t-on au Mexique que c'est du côté des procédés par la voie humide que l'on doit attendre des résultats plus économiques.

La dépense de la préparation mécanique, du loyer et des frais généraux d'administration représente 0,19 du montant de l'argent retiré, et 0,56 de la valeur du traitement ; or, pour tout traitement par la voie humide, cette dépense est indispensable, et reste la même.

On admet que l'amalgamation au Mexique, sans y comprendre les frais de trituration, ne coûte en argent que 0,0005 du poids du minerai, et 0,0009, en y comprenant ces frais. En admettant une teneur moyenne en argent de 0,00150, la dépense s'élèverait donc aux trois cinquièmes de la teneur ; or, comme la perte en mercure s'élève au moins au poids de l'ar-

gent retiré, on conçoit que le prix du mercure exerce une grande influence sur l'exploitation des mines du Mexique.

« Quelles seraient donc les conséquences du manque presque « complet de ce métal, dit M. Duport Saint-Clair (page 405 de « l'ouvrage cité), si, par un de ces événements peu probables « sans doute, mais cependant possibles, la mine d'Almaden ve- « nait à cesser de fournir du cinabre, soit par des éboulements, « soit par une trop grande abondance des eaux, soit enfin « parce que tout le minerai suffisamment riche en mercure au- « rait été extrait? La production du vif-argent, limitée alors à « celle des mines de la Carniole, serait bien insuffisante pour « les besoins; il s'ensuivrait une hausse de prix telle qu'elle « équivaudrait en quelque sorte à une disette absolue. Que « deviendrait alors l'extraction de l'argent au Mexique? Il y a « quelques années, cette question eût été fort embarrassante à « résoudre; car on ne connaissait aucun autre moyen d'extraire « l'argent du minerai que la fonte ou l'amalgamation. Les sa- « vantes recherches auxquelles s'est livré M. Becquerel, avec « toute la persévérance que demande toujours la première ap- « plication de la science à l'industrie, ont présenté un moyen « tout nouveau à la métallurgie par l'emploi des forces électri- « ques. Initié par l'inventeur lui-même dans tous les détails de « ce nouveau procédé, j'ai pu me convaincre de la possibilité « de son application industrielle sur les minerais du Mexique, « autant par des expériences faites sur 4,000 kilogrammes de « minerai des principaux districts, que j'avais fait venir à « Paris il y a trois ans, que par celles que j'ai répétées moi- « même sur les lieux. La possibilité de l'application sur une « grande échelle une fois constatée, la question se réduisait à « une comparaison de chiffres pour le coût des anciens et du « nouveau système; et les premières recherches que j'ai faites

« sur la métallurgie de l'argent n'ont pas eu dans le principe « d'autres motifs; mais je n'ai pas tardé à leur donner plus de « développement, afin de donner aux métallurgistes un tableau « exact de l'état dans lequel se trouvent les divers traitements « au Mexique, et aux économistes des renseignements sur la « production présente et même future de l'argent, assez com- « plets pour établir avec quelque certitude des calculs sur la « valeur de ce métal, comparé à d'autres valeurs. Le résultat « de mes recherches a été favorable au procédé électro-chimi- « que pour un grand nombre de minerais, je ne dis pas seule- « ment dans l'hypothèse assez peu probable d'un manque ab- « solu de mercure, mais même avec le haut prix actuel du « vif-argent. Dès lors on serait en droit de s'étonner que ce « procédé n'ait pas reçu un commencement d'application. Les « causes qui l'ont empêché ayant des caractères généraux as- « sez importants relativement à l'établissement de tout procédé « nouveau, j'entrerai à cette occasion dans quelques détails sur « ce sujet. La simplicité des appareils de l'amalgamation mexi- « caine est d'abord un obstacle pour toute innovation; vient « ensuite l'habitude d'un art pratiqué depuis trois siècles, et « dès lors parfaitement étudié sous le rapport économique; la « nécessité d'opérer sur des masses considérables, pour qu'on « ait foi au procédé, et l'obligation d'entrer de prime abord « dans des débours d'autant plus coûteux que toute construc- « tion industrielle est fort chère au Mexique, arrivent enfin « ébranler le zèle des novateurs.

« Le mercure étant le principal agent chimique employé « dans le travail actuel, son prix a tout naturellement une « grande portée sur la comparaison des procédés usités avec « ceux qu'on peut vouloir leur substituer, puisque, soit que « l'on emploie un peu de mercure, soit que l'on n'en emploie

« pas du tout, il y a évidemment tendance à diminuer les de- « mandes de ce métal, et dès lors à en faire baisser le prix. « Cette chance de baisse sur une marchandise dont le prix dé- « pend, comme c'est assez généralement le cas, du coût de sa « production, offre peu de probabilité de variations très-consi- « dérables ; mais pour le mercure il en est tout autrement, « car, par suite du monopole, son prix actuel peut s'évaluer au « quadruple de son coût, et, à mesure que son emploi serait « moins considérable, le prix en pourrait baisser presque « spontanément d'une manière désastreuse pour les établisse- « ments destinés à remplacer le mercure ou à diminuer sa « perte, dans l'amalgamation, par quelque nouvelle inven- « tion. »

M. Duport fait remarquer encore qu'indépendamment des circonstances relatives au mercure, il faut aussi y joindre celles qui concernent le sel marin, qui forme la base du procédé électro-chimique, et dont la perte ne peut être négligée qu'autant que le prix de cette substance est très-peu élevé; or, c'est ce qui n'a pas lieu dans la plupart des localités du Mexique. Ces difficultés écartées, rien ne s'opposerait à l'emploi du procédé électro-chimique pour le traitement des minerais d'argent dans cette contrée.

Dans toutes les régions de mine où le sel marin est à bas prix, il est toujours possible d'appliquer le procédé électro-chimique, pourvu toutefois que l'on puisse se procurer le combustible nécessaire pour le grillage du minerai, quand sa préparation par la voie humide ne peut être effectuée.

Nous dirons enfin qu'un des grands avantages du procédé nouveau est son emploi pour le traitement des minerais plombeux, de la galène même, et des minerais très-cuivreux, qui ont résisté jusqu'ici à l'amalgamation américaine ou freybérienne.

L'exposé du traitement électro-chimique des minerais est divisé en deux parties : la première comprend les principes généraux, dont la connaissance est indispensable pour l'intelligence du procédé électro-chimique ; la seconde traite d'abord des divers modes de traitement des minerais d'argent, de cuivre et de plomb par la voie humide, en y comprenant l'amalgamation américaine, l'amalgamation freybérienne et l'amalgamation au cazo ou par la coction, lesquelles ont des rapports plus ou moins rapprochés avec le traitement électro-chimique, qui leur emprunte toutefois les mêmes préparations mécaniques et chimiques. Viennent ensuite les différentes méthodes électro-chimiques à l'aide desquelles on retire à l'état métallique l'argent, le cuivre et le plomb de leurs minerais respectifs, méthodes qui permettent aussi de séparer l'argent du plomb, de la galène, sans avoir recours à la coupellation; ou, si elle est nécessaire, elle n'a lieu que sur un plomb d'œuvre très-riche, et même on l'évite en employant le cazo, qui donne immédiatement l'argent dans un grand état de pureté, en faisant subir à la galène la même préparation que pour le traitement électro-chimique.

On expose ensuite toutes les questions secondaires qui se rattachent à ces nouvelles méthodes de traitements métallurgiques. Si nous ne pouvons dire encore que ces méthodes seront adoptées sans difficulté par l'industrie, nous pensons néanmoins que les travaux qui ont servi à les fonder contribueront à hâter le moment où elles seront appliquées utilement dans toutes les localités où le bois est rare et le sel ordinaire abondant.

TRAITÉ D'ÉLECTRICITÉ ET DE MAGNÉTISME.

LIVRE PREMIER.

ÉLECTRICITÉ STATIQUE. PHÉNOMÈNES GÉNÉRAUX.

CHAPITRE PREMIER.

Développement de l'électricité. Principes fondamentaux.

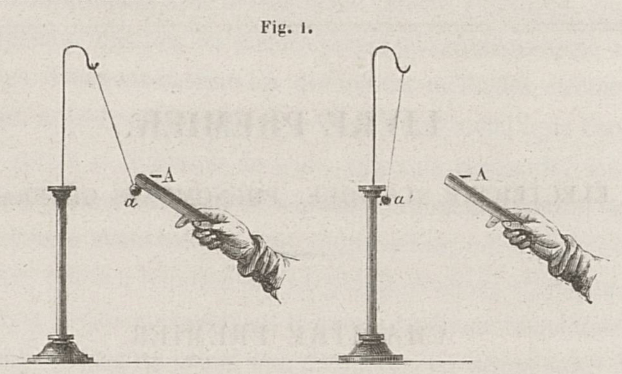
Etats électriques des corps. Lorsqu'on frotte un bâton de gomme laque ou de cire d'Espagne avec une peau de chat ou un morceau d'étoffe, ce bâton acquiert la faculté d'attirer les corps légers placés à peu de distance. Si on le présente à une balle de moelle de sureau suspendue à un fil de cocon, celle-ci est également attirée jusqu'au contact, puis repoussée immédiatement.

D'autres corps, quand ils sont frottés, se comportent comme la gomme laque, entre autres la résine, l'ambre, le soufre, le verre bien sec, etc., etc. Les corps dans cet état sont dits *électrisés*, et on appelle *électricité* la cause ou l'agent en vertu duquel les effets produits ont lieu. Le mot *électricité* vient du mot grec ηλεκτρον (ambre), substance dans laquelle la propriété attractive a été observée pour la première fois. Cette propriété n'est pas constamment inhérente à la matière, ni nécessaire à l'existence du

corps, car on peut la lui ôter ou la lui donner sans que son état physique soit changé. Cependant, dans certaines circonstances, lorsque l'on dirige convenablement l'action de l'électricité dans les combinaisons, il en résulte des effets de décomposition extrêmement remarquables, que ne pourraient produire les autres agents physiques, et qui seront étudiés dans le cours de cet ouvrage.

Si de prime abord les effets produits paraissent être les mêmes, on ne tarde pas à reconnaître que tous les corps frottés n'éprouvent pas des modifications identiques, comme on peut s'en convaincre de la manière suivante :

Fig. 1.



On approche un bâton de gomme laque électrisé A de la balle de moelle de sureau *a* suspendue à un fil de cocon attaché à une petite tige de cuivre recourbée, laquelle est fixée sur un pied en verre enduit de vernis à la gomme laque. La petite balle est attirée par A jusqu'au contact, puis repoussée immédiatement, et elle prend la position *a'*. Ce petit pendule conserve pendant plusieurs minutes, et même plus longtemps, suivant l'état hygrométrique de l'air, la propriété d'être repoussé par la gomme laque frottée, si l'on a soin de ne pas le toucher avec le doigt ou avec un corps métallique ; mais en lui présentant un tube de verre bien sec, préalablement frotté avec du drap, il est attiré par ce tube au lieu d'être repoussé.

On peut faire l'expérience inverse en commençant par approcher du pendule primitivement à l'état naturel un bâton de verre électrisé ; il y a d'abord attraction, puis répulsion. En présentant ensuite à ce pendule un bâton de gomme laque frotté il y a attraction.

Ainsi, le tube de verre et le bâton de gomme laque frottés, quoique tous deux ayant la propriété d'attirer des corps légers, sont cependant dans deux états électriques opposés, puisque le verre

attire un petit pendule électrique que la gomme laque ou la résine repousse, et réciproquement.

Tous les corps se comportent comme le verre, la gomme laque ou la résine, pourvu qu'on les mette dans un état convenable. On est conduit ainsi à distinguer deux états électriques dans les corps, et par suite deux espèces d'électricité : l'électricité *vitrée* et l'électricité *résineuse*. A ces dénominations on a substitué celles d'électricité *positive* et d'électricité *négative*, qui sont généralement adoptées, indépendamment de toute explication théorique sur l'origine de l'électricité. Ces deux électricités sont représentées par les signes algébriques + et —, comme il suit :

+ électricité positive (vitrée),
— électricité négative (résineuse).

Il est facile maintenant de démontrer que les électricités de même nom se repoussent, et que celles de nom contraire s'attirent : lorsqu'on approche le bâton électrisé du pendule à l'état naturel, et que celui-ci est attiré, il n'est repoussé immédiatement après que parce qu'il s'électrise par contact de la même manière que le corps électrisé qu'il touche ; possédant alors la même électricité, il y a répulsion. Une fois électrisé, le pendule est attiré par les corps chargés d'électricité différente, et repoussé par les corps semblablement électrisés.

Fig. 2.



On peut également prouver ce fait en suspendant à côté l'un de l'autre deux petits pendules en moelle de sureau fixés à une tige de cuivre attachée à la partie supérieure d'une cloche en verre comme l'indique la figure ; au moment où on approche du bouton de cuivre qui surmonte la tige un corps électrisé, les deux balles qui étaient au contact, s'électrisant de la même manière, s'écartent aussitôt l'une de l'autre.

Dans le dégagement de l'électricité les deux états électriques différents se manifestent constamment au même degré, l'une dans le corps frotté, l'autre dans le frottoir, de sorte que, lorsque les deux électricités dégagées se réunissent, le corps ne possède plus aucun pouvoir d'attraction ou de répulsion ; on dit alors que le corps est à l'état naturel. On démontre ce fait avec deux disques, l'un en verre, l'autre en cuivre, ou bien avec deux disques de bois,

l'un recouvert de gomme laque, l'autre entouré de laine, et munis de manches en verre enduits de gomme laque. En frottant ces deux disques l'un contre l'autre et les présentant séparément à un petit pendule électrique, on reconnaît qu'ils sont tous deux électrisés, mais de signe contraire; si on les approche alors l'un de l'autre, une fois réunis ils n'agissent plus sur ce pendule ni par attraction ni par répulsion. Ainsi, quand on frotte deux corps l'un contre l'autre, le corps frotté prend une électricité, et le corps frottant s'électrise de signe contraire; dans le cas où cet effet n'est pas produit, cela tient à ce que l'un des deux corps n'est pas isolé convenablement.

Hypothèses sur l'origine de l'électricité. Pour expliquer les différents phénomènes résultant des attractions et répulsions électriques, on a émis diverses hypothèses, dont aucune à elle seule ne représente l'ensemble de tous les phénomènes. L'hypothèse d'un seul fluide consiste à admettre que l'électricité est un fluide impondérable répandu dans tous les corps et constituant leur état naturel. Lorsqu'il est accumulé ou dilaté dans un corps, il en résulte un excès ou un manque de fluide qui donnent lieu à des états électriques différents. L'hypothèse des deux fluides suppose l'existence de deux fluides impondérables doués de propriétés contraires, et dont la réunion constitue le fluide naturel. Développer l'électricité, dans cette hypothèse, c'est opérer la séparation des deux fluides, tandis que, dans la première, c'est troubler l'équilibre du fluide électrique, lequel devient en excès d'un côté et en défaut de l'autre. Mais, dans l'une comme dans l'autre supposition, on admet que les corps renferment une immense quantité de fluide naturel, et que l'on ne peut atteindre la limite de la décomposition ou de l'accumulation dans l'acte de l'électrisation qu'en désunissant les molécules, c'est-à-dire en détruisant la force d'agrégation. On doit ajouter que l'on attribue les attractions et les répulsions aux actions des électricités entre elles, et non à l'action de l'électricité sur les molécules des corps.

Indépendamment de ces hypothèses fondées sur l'existence d'un ou de deux fluides, on a émis l'opinion que les effets électriques pourraient bien résulter de mouvements vibratoires excités dans un milieu pénétrant tous les corps, répandu dans tout l'univers, et qui a reçu le nom d'éther.

Mais jusqu'ici on n'a pas lié encore l'ensemble des phénomènes électriques en partant d'une de ces hypothèses; aussi nous borne-

rons-nous à appeler *électricité* la cause de tous les effets; *électricité naturelle*, celle qui existe dans les corps; *électricités positive et négative*, les états opposés dans lesquels se trouvent les corps, sans spécifier s'ils doivent ces états à l'action d'un ou de deux fluides ou à un mouvement vibratoire existant dans un milieu qui les pénètre. Notre but est seulement d'exposer dans cet ouvrage l'ensemble des effets résultant de l'action des électricités, leur liaison réciproque et leur intervention dans une foule de phénomènes naturels, chimiques et physiologiques. Les dénominations d'*électricité statique* et d'*électricité dynamique* se rapportent à l'état d'équilibre de cet agent à la surface des corps, et à son état de mouvement quand il se propage dans leur masse.

Corps conducteurs et corps non conducteurs. Si l'on frotte une tige de cuivre que l'on tient à la main avec une peau de chat ou un morceau de drap, et qu'on l'approche d'un pendule de moelle de sureau, on n'observe aucun effet. Mais si cette tige est fixée à un manche de verre recouvert de gomme laque, elle acquiert, après le frottement, la faculté d'attirer la balle de sureau. Vient-on à toucher la tige avec la main, son état électrique disparaît tout à coup, ce qui n'a pas lieu avec une tige de verre ou un bâton de gomme laque. Le cuivre peut donc acquérir la puissance électrique, et la perdre promptement, mais dans des conditions particulières. Cet effet est dû à ce que le cuivre *conduit l'électricité*, tandis que le verre ne la conduit pas, ou du moins la conduit à un très-faible degré.

On arrive à la même conclusion à l'aide de l'expérience suivante : on forme un petit pendule électrique analogue à celui de la fig. 1. La petite balle de moelle de sureau est attachée à un fil métallique au lieu d'un fil de cocon, et on remplace le support en verre par un support en métal. En approchant un bâton de résine électrisé de ce petit pendule, il est attiré, et il reste en contact avec ce bâton au lieu d'être repoussé; cet effet résulte de ce que le pendule n'étant plus isolé, l'électricité de la petite balle de sureau s'écoule continuellement dans le sol par le fil et la tige métallique, jusqu'à l'entière disparition de l'électricité du bâton de résine.

Les corps peuvent donc être divisés en corps conducteurs et en corps non conducteurs ou isolants. La première classe comprend les métaux, l'anthracite, la plombagine, le coke, le charbon bien recuit, les pyrites, la galène, le peroxyde de manganèse; puis viennent à un degré moindre les dissolutions salines, l'eau, etc.,

et l'on peut même ajouter le corps humain, en raison des parties liquides qu'il renferme. La seconde classe se compose des corps médiocres conducteurs ou non conducteurs (isolants), tels que les résines, le soufre, la gutta-percha, le verre sec, la soie, le coton, le papier, les liquides oléagineux, l'air et les gaz secs.

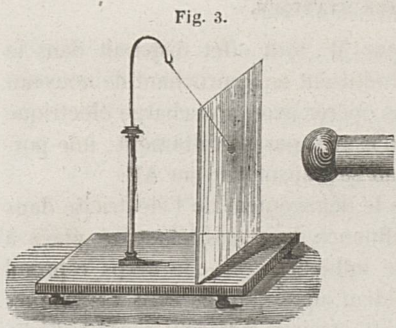
Le charbon est bon conducteur dans certaines conditions moléculaires; le fusain qui n'a éprouvé qu'une demi-carbonisation ne conduit pas; la houille renfermant beaucoup de bitume est dans le même cas; quant au diamant, il est isolant, quoique formé de carbone pur. L'air et les gaz secs sont isolants; humides, ils conduisent : c'est par ce motif que, dans les temps humides, les expériences d'électricité statique en général ne réussissent pas. Le verre, étant toujours recouvert d'une couche d'eau hygroscopique, devient alors conducteur; on ne peut donc l'employer comme isolant qu'en le chauffant ou le recouvrant de vernis à la gomme laque, substance peu hygroscopique.

Ces propriétés appartiennent aux corps ci-dessus désignés à la température ordinaire; on verra dans le livre II comment les effets se modifient quand leur température varie. Nous pouvons dire ici seulement qu'en général la chaleur augmente la faculté conductrice des corps mauvais conducteurs. Ainsi, le verre, à la température de 200°, conduit; l'air et les gaz chauds conduisent également, puisque la flamme jouit de la propriété de livrer passage à l'électricité. Le sol est conducteur; quand l'électricité libre n'est pas arrêtée par un corps isolant, elle s'écoule dans la terre, que l'on appelle *réservoir commun*, par l'intermédiaire des corps conducteurs en communication avec elle, tels que les parois des maisons, l'air humide. Si donc on veut conserver à un corps conducteur l'électricité qu'on lui a communiquée, il faut le placer dans un air sec, sur un morceau de verre enduit de gomme laque, ou sur de la résine.

Il résulte également de ce qui précède que les corps mauvais conducteurs sont les seuls qui puissent s'électriser par frottement en les tenant à la main; les autres doivent être isolés.

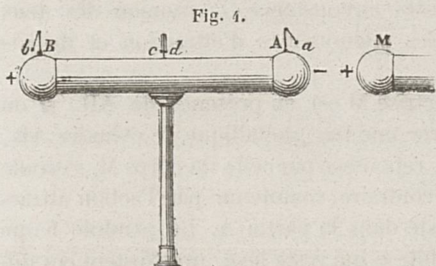
Action à distance. Électricité par influence. Il est évident que les actions électriques se transmettent à distance, puisque les corps légers, la moelle de sureau, le papier, sont attirés à une certaine distance quand on approche un bâton de gomme laque frotté, ou tout autre corps électrisé. Ces actions ont encore lieu au travers de l'air, du verre et d'autres corps.

Fig. 3.



On démontre cette propriété en interposant un carreau de verre sec entre un pendule et un corps électrisé; l'attraction se fait aussi bien que si le carreau n'existait pas. Mais si on substitue au verre un corps conducteur, il se produit d'autres effets que nous allons analyser.

Fig. 4.



On place un cylindre en cuivre AB, arrondi vers ses extrémités, sur un support isolant; à chaque extrémité sont fixés des petits pendules en sureau *a* et *b*, suspendus à des fils de lin ou à des fils métalliques et attachés à des petites tiges de métal. Au milieu sont également placés deux petits pendules *c*, *d*.

Si l'on approche du cylindre AB un bâton de gomme laque électrisé, ou mieux le conducteur M d'une machine électrique construite comme nous l'indiquerons plus loin et chargée de l'une des deux électricités, d'électricité positive par exemple, on observe les effets suivants :

1° Les deux pendules extrêmes *a* et *b* divergent; au milieu les pendules sont sensiblement au repos. Si l'on approche des différents points du cylindre AB un petit pendule électrique à l'état naturel, on trouve que l'action va en augmentant depuis le milieu du cylindre jusque vers les deux extrémités.

2° Chaque moitié du cylindre AB est électrisée différemment. La partie A, qui est la plus près de M, se charge d'électricité contraire à celle que possède ce corps; la partie B est chargée de même électricité.

On le démontre en approchant successivement de chaque pendule *a* et *b* une tige de verre électrisée ou un bâton de résine; dans le premier cas, la tige de verre, qui est positive, attire *a* et repousse *b*; le bâton de résine repousse *a* et attire *b*.

3° En enlevant le conducteur M, tout effet disparaît dans le cylindre isolé. Les effets se reproduisent en approchant de nouveau le corps électrisé. Il ne faut pas opérer avec une charge électrique trop forte, car l'air interposé n'isolant pas parfaitement, une portion de l'électricité de M pourrait se transmettre sur AB.

Ces effets montrent bien que le dégagement de l'électricité dans le cylindre AB a lieu par l'influence du corps électrisé placé à distance, puisque, quand cette influence cesse, le corps reprend son état naturel. Il est bien évident aussi que les états électriques + et — résultent de deux états contraires, puisque, comme on l'a vu plus haut dans une autre circonstance, la réunion des deux électricités anéantit tous les phénomènes d'attraction et de répulsion.

4° Lorsque le corps électrisé M est en présence de AB, si on touche avec la main ou avec une tige métallique le cylindre AB, l'électricité de même nom, repoussée par celle du corps M, s'écoule dans le sol; celle de nom contraire, maintenue par l'action attractive du corps électrisé, reste dans la partie A. Le pendule *b* qui tombe au repos, et le pendule *a* qui reste levé, manifestent ces différents effets.

Le phénomène a lieu quel que soit le point où l'on touche AB; cet effet résulte de ce que l'action attractive du conducteur M maintient l'électricité contraire en A, même quand AB communique avec le sol par la partie A.

5° Si, après avoir touché AB en un point quelconque, on retire le corps électrisé M, alors l'électricité contraire à celle du corps se répand sur tout le cylindre, et les pendules divergent tous en vertu de la même électricité, mais à un degré différent.

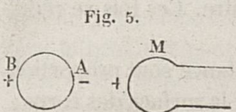
On peut donc employer ce mode de dégagement d'électricité pour produire à distance sur un corps conducteur une charge électrique de nom contraire à celle d'un corps électrisé; aussi est-il fréquemment usité.

Ces effets ont lieu dans les corps conducteurs quelle que soit la distance des corps électrisés et la nature de l'électricité; seulement l'intensité de la charge par influence dépend de la distance, de la puissance électrique avec laquelle on opère et de la nature du corps interposé. La quantité que l'on peut dégager ainsi est immense et n'a de limite que celle de la charge que l'on donne au corps électrisé et la résistance du milieu qui sépare les deux corps.

On explique aisément, à l'aide de l'action par influence, l'effet

qui a lieu quand on approche un corps électrisé d'un pendule en sureau isolé :

Fig. 5.



Le corps électrisé M décompose l'électricité naturelle du pendule BA ; l'électricité de nom contraire à celle de M est attirée en A, celle de même nom repoussée en B. L'action attractive entre l'électricité + de M et l'électricité — de A est plus forte que l'action répulsive qui a lieu entre l'électricité + de M et l'électricité + de B, parce que la distance AM est moindre que BM ; l'attraction l'emporte alors, et la balle de sureau vient au contact de M ; mais immédiatement après une partie de l'électricité + de M neutralise l'électricité — de A, l'attraction n'existe plus, la répulsion seule l'emporte, et la balle de sureau est repoussée. Si BA est en communication avec le sol, il n'y a pas de répulsion, et l'attraction subsiste, car la décomposition par influence a lieu continuellement jusqu'à neutralisation complète de toute l'électricité de M.

Voilà ce qui se passe avec des corps conducteurs ; mais avec des corps non conducteurs la non-conductibilité s'oppose, non pas à la séparation des deux électricités dans les espaces moléculaires, mais à leur transmission de molécule à molécule, et on ne doit pas observer des phénomènes semblables. Cependant, comme on le verra en traitant des condensateurs, à la fin de ce livre, l'électricité peut pénétrer dans le verre et dans les autres corps non conducteurs jusqu'à une certaine profondeur, ce qui indique que l'isolement de ces substances n'est jamais parfait.

CHAPITRE II.

Lois des attractions et répulsions électriques. Distribution de l'électricité à la surface des corps.

Lois des attractions et répulsions électriques. — Balance de torsion. Quand deux corps électrisés agissent l'un sur l'autre, par attraction ou répulsion, les effets sont d'autant moindres que leur distance est plus grande. Les lois de ce phénomène sont très-sim-

ples quand les actions entre les corps électrisés ne se compliquent pas d'effets par influences exercées de la part des électricités de chacun d'eux sur l'électricité naturelle de l'autre. Ces lois se réduisent aux deux suivantes :

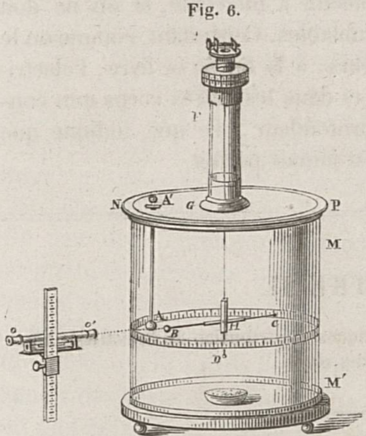
1° Les attractions ou répulsions à égale distance sont proportionnelles aux quantités d'électricité réparties sur la surface des corps;

2° Les attractions et répulsions, toutes choses égales d'ailleurs, sont en raison inverse du carré de la distance.

Cette seconde loi est celle du décroissement des forces naturelles qui s'exercent autour d'un centre sans déperdition sensible et alors que la figure des corps n'entre pour rien dans l'expression du phénomène. On s'en rend facilement compte en concevant qu'à une distance double l'effet se trouve réparti sur une surface sphérique qui, croissant comme le carré du rayon, est quadruple ; par conséquent, l'action exercée sur une même étendue doit être quatre fois moindre et ainsi de suite.

Coulomb a démontré, par expérience, ces lois fondamentales à l'aide d'un appareil très-précieux en physique et servant à mesurer avec la plus grande exactitude de très petites forces. Cet appareil est la balance de torsion, autrement dit balance de Coulomb, et dont voici la description :

Fig. 6.



MM' est une cage en verre munie d'un couvercle formé d'une glace plane NP, et desséchée à l'intérieur avec du chlorure de calcium ; elle renferme deux corps électrisés destinés à réagir l'un sur l'autre. L'un de ces corps est une sphère A en métal, fixée à une tige isolante A'A qui traverse le couvercle NP, et est maintenue par elle dans une position fixe à quelque distance des parois de la cage. L'autre corps électrisé est une sphère métallique ou un disque en clinquant B attaché à un levier horizontal BC en gomme laque, ou à une tige de verre très-mince enduite de même substance. Ce levier est fixé au moyen d'une petite pince à un fil qui le maintient suspendu au milieu de la cage;

un petit contre-poids C le rend horizontal. Quelquefois, pour amortir les oscillations, on fait plonger dans une dissolution de chlorure de calcium une petite sphère D fixée au-dessous du levier dans le prolongement du fil de suspension.

Le fil de suspension est en argent, d'un très-petit diamètre et non recuit, afin de lui laisser toute son élasticité. Ce fil est renfermé dans un cylindre de verre creux FG, au haut duquel est adapté un tambour divisé qui tourne avec frottement autour du cylindre sur un tambour fixe. Au centre de ce tambour est placé un petit treuil T qui sert à retenir le fil et à élever ou abaisser le bras du levier CD à l'aide d'un bouton situé sur le côté. Un index est soudé à la partie fixe de la douille autour de laquelle se meut le tambour. Veut-on tordre le fil d'un certain nombre de degrés, on tourne convenablement le tambour mobile, après avoir mis préalablement le zéro de l'échelle vis-à-vis du zéro du vernier tracé sur la partie inférieure du tambour fixe. Le treuil pouvant tourner aussi indépendamment du tambour, on place là où on le juge convenable le disque de clinquant B.

On mesure facilement les écarts de l'aiguille en gomme laque quand on lui présente le corps électrisé A, en plaçant à la même hauteur, sur la cage, une échelle divisée en degrés; mais les cages cylindriques n'étant jamais bien calibrées, on leur substitue des cages carrées. Veut-on, dans les expériences, ramener le disque à la même position et ne faire varier que les angles de torsion du fil nécessaires pour cela, il est préférable d'avoir une petite lunette OO' à côté de la cage, et de viser à l'aide de cette lunette un trait tracé sur le plan d'épreuve B, que l'on fait coïncider avec une division du micromètre situé au foyer de l'oculaire ; on est certain alors de ramener toujours le corps B à la même position d'équilibre. La lunette peut également se placer sur le couvercle NP, si ce couvercle est une glace à faces parallèles.

Plus les forces que l'on veut comparer entre elles sont petites, plus il faut donner de sensibilité à l'appareil, et plus les fils doivent être longs et fins, attendu que, suivant les expériences de Coulomb, la force de torsion est en raison inverse des longueurs des fils, et proportionnelle aux quatrièmes puissances de leur épaisseur. Les fils longs ont aussi l'avantage de pouvoir se tordre d'un grand nombre de degrés sans perdre sensiblement de leur élasticité. Pour s'assurer si les fils n'ont pas perdu de leur élasticité

après plusieurs expériences, il faut que l'aiguille de gomme laque revienne exactement dans sa position primitive quand l'index du micromètre supérieur est ramené à zéro.

Telle est la construction de la balance électrique ou de torsion qui est due à Coulomb. Son emploi repose sur ce principe que la force de torsion est exactement proportionnelle à l'angle de torsion; ainsi, en supposant que l'on électrise semblablement les deux sphères ou disques de clinquant A et B, A étant fixe, B sera repoussé jusqu'à ce que l'action répulsive fasse équilibre à la force de torsion qui tend à ramener le fil dans sa première position. En prenant pour zéro le point de contact de A et de B, l'arc AB mesurera la torsion et par conséquent la répulsion. Si actuellement on tord le fil à l'aide du tambour E en le tournant dans le même sens, le disque B se rapprochera de A, et, dans chaque position d'équilibre, la force répulsive sera mesurée par l'arc dont on aura tordu le tambour supérieur, augmenté de l'arc BA qui mesure la position angulaire actuelle de B.

On peut par un procédé analogue mesurer l'attraction entre deux sphères électrisées différemment, en tordant le fil en sens inverse et mettant un fil de soie en travers de la cage entre A et B, afin d'empêcher leur contact.

Coulomb a pu comparer de cette manière les forces répulsives et attractives qui s'exercent entre les corps électrisés semblablement ou différemment. Lorsque les distances étaient très-petites, elles étaient représentées par les arcs correspondant aux positions des deux corps A et B sur le cercle qui entoure la cage de la balance. Ayant donc le rapport des forces et celui des distances, il a pu vérifier que les attractions et répulsions étaient en raison inverse du carré des distances, comme les attractions planétaires.

Quant à la première proposition énoncée au commencement de ce chapitre, savoir que les actions sont proportionnelles aux quantités d'électricité possédées par les corps, il l'a démontré, en touchant, à un moment donné, une des sphères électrisées, la sphère A par exemple, avec une autre sphère semblable et à l'état naturel, afin de lui enlever la moitié de l'électricité qu'elle possédait. On peut admettre qu'à l'instant du contact il y a partage égal d'électricité; A n'a plus alors que moitié de la quantité d'électricité qu'elle avait auparavant. Dans ce cas, la torsion nécessaire pour maintenir les sphères à la même distance est réduite à moitié.

Il est indispensable que les sphères A et B aient des dimensions sensiblement égales et possèdent des charges électriques qui ne soient pas trop disproportionnées; sans cela il y aurait des effets d'influence qui pourraient masquer la loi générale.

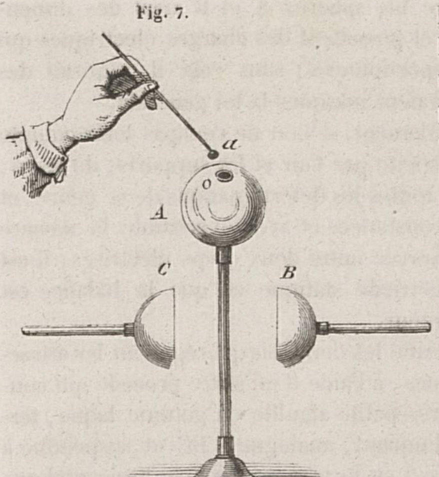
Il faut aussi opérer rapidement, si l'on ne veut pas tenir compte de la déperdition de l'électricité par l'air et les supports; du reste, l'appareil est très-propre à toutes les déterminations de ce genre, et donne dans toutes les circonstances et avec exactitude la mesure de la réaction électrique exercée entre deux corps électrisés; il est pour les expériences d'électricité statique ce que la balance est pour les actions de la pesanteur.

Coulomb a également vérifié les deux lois qui régissent les attractions et répulsions électriques, à l'aide d'un autre procédé qui consiste à faire usage d'une très-petite aiguille en gomme laque, terminée par un disque en clinquant, analogue à BC et suspendue à un fil de cocon, de manière à en former un pendule horizontal que l'on fait osciller à des distances différentes d'une grande sphère électrisée; on déduit de la formule du mouvement oscillatoire la réaction électrique qui a lieu entre les deux corps. Cette réaction est proportionnelle au carré du nombre d'oscillations exécutées par la petite aiguille dans un temps donné.

Distribution de l'électricité à la surface des corps. Les faits exposés précédemment montrent que les électricités de même nom se repoussent et que celles de nom contraire s'attirent; lorsqu'on charge un corps d'électricité, il doit donc s'opérer dans tous les points une répulsion électrique qui tend à chasser l'électricité au dehors. Si le corps n'est pas conducteur, cet effort se trouve borné aux molécules des corps; s'il est conducteur, l'électricité peut passer d'une molécule à une autre et se porter vers la surface. Les expériences de Beccaria et de Coulomb ont mis ce fait hors de doute. Le premier l'a prouvé comme il suit :

On prend une grande sphère creuse en métal A, supportée par un pied isolant ou bien suspendue par un cordon de soie afin que l'isolement soit plus parfait. En une partie quelconque on pratique une ouverture O, destinée à introduire le petit disque de métal *a* fixé à l'extrémité d'une tige en gomme laque et appelé plan d'épreuve. On touche d'abord la surface extérieure de la sphère électrisée préalablement avec ce plan que l'on présente ensuite à un petit pendule électrique, et l'on reconnaît qu'il a enlevé une certaine quantité d'électricité au corps touché; mais si, au lieu de toucher

Fig. 7.



la surface extérieure avec le disque, on touche l'intérieur en introduisant le plan d'épreuve *a* par l'ouverture O, il ne prend aucune charge sensible d'électricité. Cette expérience prouve évidemment que toute l'électricité communiquée au corps A s'est portée à la surface extérieure.

On peut aussi arriver à cette conclusion en prenant deux calottes sphériques B et C en métal et très-minces, enveloppant complétement la sphère A et munies de deux manches isolants. On électrise la sphère A, on l'enveloppe des deux calottes qu'on retire ensuite, et l'on trouve que toute l'électricité a été enlevée et s'est repandue sur B et C.

En opérant ainsi on ne peut avoir qu'une approximation, vu les conditions défavorables dans lesquelles on se trouve, d'abord par l'existence de l'ouverture O, ensuite lors de la séparation des deux calottes sphériques B et C. Mais la balance de Coulomb donne un moyen de vérifier avec la plus grande exactitude ce transport de l'électricité à la surface des corps. On forme des sphères métalliques pleines et creuses, en métal et en substances non conductrices, mais de même diamètre, et dont la surface extérieure est rendue conductrice à l'aide de papier d'étain collé; on trouve alors que les réactions électriques produites par ces différentes sphères sur le petit disque de clinquant suspendu sont absolument les mêmes. Ce résultat montre bien que l'électricité ne se trouve pas à l'intérieur des corps électrisés.

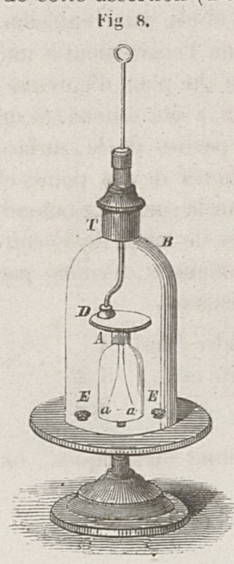
Ces effets s'observent indifféremment avec l'une ou l'autre électricité.

On peut conclure de ce qui précède que des disques en clinquant peuvent se charger d'électricité aussi bien que des sphères pleines, et qu'on peut prendre pour conducteurs électriques des tiges métalliques creuses, et même du bois ou des isolants recouverts de papier d'étain ou de feuilles de clinquant.

On considère donc l'électricité libre comme s'accumulant à la surface des corps, où elle n'est retenue que par la pression de l'air; on constate ce fait à l'aide de l'œuf électrique, du tube vide et des expériences dont il sera question dans le chapitre IV. On reconnaît effectivement qu'en raréfiant l'air, l'électricité s'échappe des conducteurs, qui auparavant conservaient leur excès d'électricité. Poisson, en partant de l'hypothèse des deux fluides électriques, admise par Coulomb, a démontré par le calcul que la loi de répulsion qui se manifeste entre les molécules électriques de même nom conduit à cette conséquence que les fluides impondérables doivent s'accumuler sur leur surface et former une couche infiniment mince, maintenue par la pression de l'air; il a confirmé ainsi les expériences de Coulomb, surtout celles dont nous parlerons plus loin. Mais nous nous bornons à indiquer l'enchaînement des phénomènes bien constatés, n'ayant adopté, dans cet ouvrage, aucune hypothèse sur la nature de l'électricité.

Si l'électricité est retenue à la surface des corps par la pression de l'air, comme l'expérience le démontre, on ne peut admettre cependant cette conclusion d'une manière absolue, surtout pour de faibles intensités électriques; en effet, dans le vide, on ne voit pas pourquoi l'électricité s'échapperait s'il n'y avait aucune action par influence exercée à distance. Hawksbée, Gray, M. Harris ont montré que, dans le vide, des charges électriques assez faibles pouvaient être maintenues. L'expérience suivante vient à l'appui de cette assertion (Becquerel).

Fig 8.



Sur une platine portative pouvant s'adapter à une machine pneumatique, on place un petit électroscope à feuilles d'or EE, composé d'une petite cloche en verre, munie d'une douille en cuivre A, dans laquelle se trouvent deux feuilles d'or verticales a, a', en contact et s'écartant l'une de l'autre quand elles sont électrisées. La douille A est fixée à une lame de métal très mince sur laquelle est placée une lame de verre le moins hygroscopique possible. Ce petit appareil est recouvert d'une cloche B, ayant à sa partie supérieure une tubulure, munie d'une douille T portant une boîte à cuir, dans laquelle passe une tige verticale en laiton; à l'extrémité inférieure de cette tige est placé un petit tampon de peau D recouvert d'or musif ou d'au-

tres enduits excitants que l'on fera connaître plus loin. En abaissant la tige on met en contact le tampon D avec le disque en verre placé sur A, et l'on peut exercer le frottement en tournant la tige. La lame de verre s'électrise, agit par influence sur la lame métallique, et les deux feuilles d'or a, a', divergent. En faisant le vide à un millimètre de mercure du manomètre, on trouve constamment de l'électricité qui, loin de se dissiper, puisqu'il n'existe plus qu'une quantité très-faible d'air, reste pendant un temps assez considérable (une quinzaine de jours) lorsque les vapeurs aqueuses de l'intérieur de la cloche ont été préalablement enlevées à l'aide du chlorure de calcium. On voit par là que de faibles charges électriques ne s'échappent pas dans le vide, ce qui semble indiquer une action exercée de la part des molécules des corps sur l'électricité, action qui est très-faible, relativement aux réactions électriques qui ont lieu quand la charge électrique est un peu forte.

Si l'électricité se répand uniformément sur une sphère, quand le corps n'a pas une forme régulière, l'électricité, quoique se portant à la surface, se répartit fort irrégulièrement. Pour connaître cette répartition, Coulomb a opéré comme il suit : il touche un point de la surface du corps avec le plan d'épreuve décrit précédemment, qu'il place dans la balance de torsion (fig. 6) à la place de la sphère A. Le plan d'épreuve prend dans ce cas un excès d'électricité double de celui qui existe sur l'élément de surface avec laquelle il est tangent, puisque l'électricité, lors de la séparation, se répand sur ses deux faces; en le plaçant dans la balance de torsion, il y a attraction entre B et lui, puis répulsion, et la force de torsion nécessaire pour maintenir l'écartement à une certaine distance mesure l'intensité électrique du plan d'épreuve, et par conséquent celle du point du corps qui a été touché. Si on touche ainsi successivement les différentes parties de la surface du corps, on connaîtra les intensités électriques de ces points et par conséquent la répartition de l'électricité sur la surface. Coulomb a trouvé, par exemple, que, pour un cylindre de métal de 5 centimètres de diamètre et de 8 decimètres de longueur, terminé par deux petites sphères et posé sur un support isolant,

L'intensité électrique au milieu du cylindre étant	1
L'intensité à 5 centimètres de l'extrémité est...	1,25
L'intensité à l'extrémité est..............	2,3.

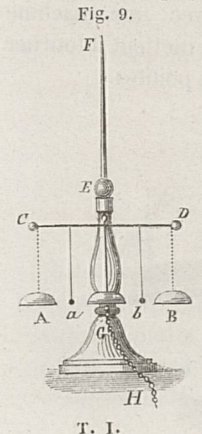
Pouvoir des pointes. En opérant sur des lames métalliques, on

trouve que l'intensité électrique s'accroît aussi beaucoup vers les extrémités, et surtout sur le tranchant des lames. Cette augmentation d'intensité aux extrémités a également lieu dans les corps prismatiques ou cylindriques très-allongés, et elle est d'autant plus grande que ces corps sont plus minces ou d'un plus petit diamètre. Il résulte de là que toutes les fois qu'un cylindre s'amincit en allant vers les extrémités, l'accroissement de l'électricité devient de plus en plus rapide ; enfin, quand le cylindre se termine en pointe, l'accumulation est si forte que la pression exercée par l'électricité ne peut plus être vaincue par la résistance de l'air ; l'électricité s'échappe alors sous forme d'aigrettes lumineuses, comme on le verra plus loin. Telle est l'explication du pouvoir des pointes.

On concoit par là que, lorsqu'un corps électrisé est armé d'une pointe, l'électricité qui se transporte à son extrémité ne pouvant s'y accumuler s'échappe continuellement. Par un effet du même genre, lorsqu'on approche d'un corps électrisé une tige terminée en pointe et touchant au sol, le corps perd toute son électricité ; dans ce cas, le corps électrisé réagit par influence sur l'électricité naturelle de la tige, attire l'électricité contraire dans la partie la plus rapprochée et repousse l'autre dans le sol ; or, la tige étant terminée en pointe, l'électricité contraire attirée ne peut s'y accumuler et vient neutraliser l'électricité du corps. Ainsi la pointe ne soutire pas l'électricité répandue sur un conducteur, mais elle permet la sortie de l'électricité contraire développée par influence, pour neutraliser l'électricité du conducteur.

On vérifie ces effets remarquables avec plusieurs appareils qui sont devenus populaires et que nous allons décrire.

Fig. 9.



Le carillon électrique se compose de deux timbres A et B, attachés à une traverse métallique CD suspendue à un bouton E qui communique à une tige terminée en pointe E F. Cette tige est isolée sur un pied en verre, de sorte que les deux timbres A et B sont isolés mais communiquent avec la traverse CD par de petites chaînes métalliques. Un troisième timbre G est suspendu par un fil de soie à la même traverse CD, et est en rapport avec le sol à l'aide d'une chaîne GH ; deux petits pendules en métal a, b, également suspendus à des fils de soie, sont interposés entre les trois timbres. Vient-on à approcher cet appa-

reil d'une machine électrique, l'électricité contraire développée par influence, ne pouvant s'accumuler sur la pointe, se renouvelle sans cesse, et il en résulte un écoulement d'électricité; les petites balles *a*, *b*, qui servent à transmettre l'électricité des timbres A et B au timbre G, vont de l'un à l'autre en les frappant, et l'écoulement de l'électricité est rendu sensible par le son produit.

Lorsque l'électricité s'échappe par une pointe, l'électrisation qu se transmet à l'air donne lieu à une répulsion mutuelle entre les particules gazeuses; si à une certaine distance ces particules peuvent se décharger, il se produit un mouvement de l'air dirigé vers les points où la décharge a lieu. Ainsi en approchant la main d'une pointe fixée sur une machine électrique on éprouve la sensation d'un courant d'air émanant de la pointe. Par un effet semblable, la flamme d'une bougie, placée de façon qu'elle soit interposée entre une pointe électrisée et un conducteur communiquant au sol, est infléchie et s'éloigne de la pointe comme elle le ferait par l'action d'un courant gazeux qui s'en échapperait.

D'après cela, quand le corps conducteur et terminé en pointe est léger et mobile, il peut se mettre en mouvement par suite de la répulsion entre l'air et la pointe. Tel est le tourniquet électrique. Ce petit appareil, placé sur un plateau isolant et communiquant à une machine, est formé d'un arbre avec différentes tiges de cuivre ayant des pointes verticales. Sur ces pointes, comme pivot, reposent de petites aiguilles métalliques horizontales mobiles, dont les extrémités sont coudées ou infléchies dans le plan horizontal et terminées en pointe. Quand on fait communiquer cet arbre avec une machine électrique, les petites aiguilles se mettent à tourner en sens inverse de la direction des pointes.

Fig. 10.

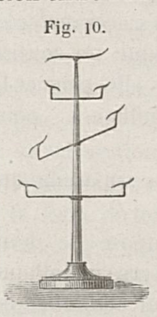
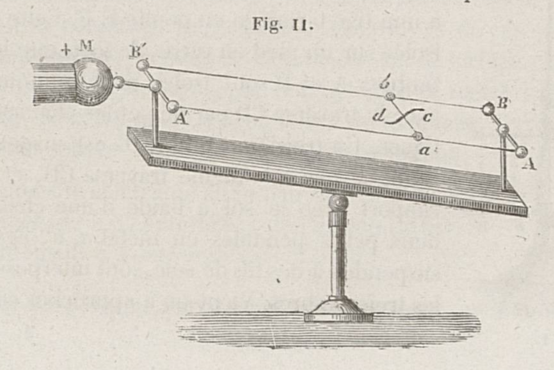


Fig. 11.



On a varié beaucoup les effets de ce genre avec d'autres appareils ; nous citerons entre autres le petit chariot électrique. Deux fils métalliques AA', BB' (fig. 11), tendus parallèlement, sont isolés et peuvent communiquer au conducteur M d'une machine électrique ; une petite tige de cuivre *ab*, terminée par deux poulies *a* et *b*, peut rouler le long des fils ; deux tiges en cuivre courbées en sens inverse, *c* et *d*, sont fixées au milieu, de façon que le centre de gravité du système mobile passe par l'axe de *ab*. Si on incline le plan des deux fils AA', BB', et qu'on électrise la machine ou le conducteur M, alors le chariot se met à tourner suivant le sens des courbures des fils *c* et *d*, et peut remonter même le plan incliné.

Si le corps mobile armé de pointes se trouvait au milieu de l'air électrisé toujours au même degré, alors aucun mouvement ne pourrait se produire ; il en serait de même dans le vide.

Tension électrique. Nous emploierons fréquemment, dans la suite de cet ouvrage, la dénomination de tension électrique pour exprimer l'intensité de l'électricité, ou du moins l'effort que fait celle-ci pour s'échapper de chaque point d'un conducteur ; la tension électrique résulte donc de l'accumulation de l'électricité en chaque point, et, quand elle est suffisante pour vaincre la pression de l'air, l'électricité franchit l'obstacle et va se porter sur le corps conducteur le plus voisin. D'après ce que nous avons vu précédemment, l'effet de la tension est mesuré à l'aide du plan d'épreuve ; dans les corps terminés en pointes elle est considérable.

CHAPITRE III.

Électroscopes et Électromètres.

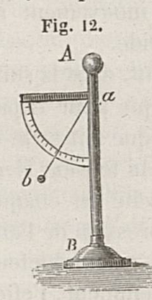
Électroscopes. Les électroscopes et les électromètres servent à accuser la présence de l'électricité libre et à mesurer son intensité ou plutôt sa tension. Nous allons parler successivement des principaux appareils en usage.

Si le corps est fortement électrisé, il suffit de lui présenter une

petite balle en moelle de sureau suspendue à un fil de cocon; il y a alors attraction, puis répulsion. Quelquefois on emploie un autre appareil qui est formé d'un petit fil de laiton terminé par deux petites boules creuses et suspendues au moyen d'une chappe en agate ou en acier sur une tige isolée terminée en pointe; cet électroscope est d'autant plus sensible que le frottement de la chappe sur le pivot est moindre.

Toutes les fois qu'il s'agit d'estimer approximativement la charge d'une batterie ou d'une machine, on emploie un petit appareil qui porte le nom d'électromètre de Henley ou à cadran. Comme cet appareil est plutôt un électroscope qu'un électromètre, nous le plaçons parmi les premiers.

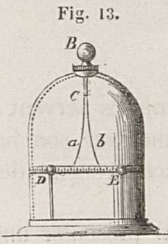
Fig. 12.



Il consiste en une tige cylindrique AB d'une matière conductrice, en ivoire, en ébène ou en cuivre, longue de 20 centimètres environ, et terminée par une boule A; immédiatement au-dessous, est fixé un quart de cercle d'ivoire dont le centre porte un axe autour duquel se meut librement une aiguille légère *ab* de 12 centimètres de longueur, et portant à son extrémité une petite balle de sureau *b*. Cette aiguille peut parcourir avec facilité le quart de circonférence divisée et donne les angles d'écartement. Dans les conditions ordinaires, l'aiguille est dans la direction verticale; mais, dès l'instant que l'appareil est électrisé, la balle s'écarte de la tige, et l'index s'en éloigne plus ou moins en raison de la tension électrique. Ce petit instrument se visse sur l'un des conducteurs d'une machine électrique ou d'une batterie.

Si la tension de l'électricité est plus faible, il faut avoir recours à d'autres appareils. Ceux dont on fait usage ordinairement sont formés d'une cloche tubulée en verre garnie à la partie supérieure de gomme laque et dans la tubulure de laquelle passe une tige métallique terminée par une sphère B. A la partie inférieure C de

Fig. 13.

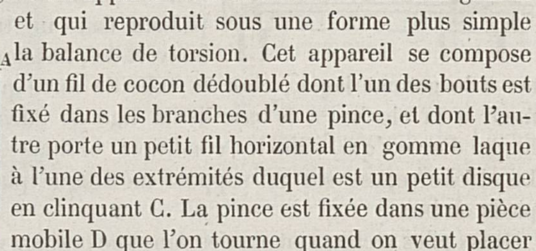


cette tige, on dispose parallèlement près l'un de l'autre deux brins de paille suspendus à deux petits anneaux mobiles de fils de métal, passant dans deux petites ouvertures de la tige C; on peut les remplacer par deux fils de métal très-fins terminés par deux petites balles de sureau et suspendus de même, ou bien, comme cela est représenté sur la figure, par deux lames d'or battu très-minces. Cette

dernière disposition donne à l'appareil une plus grande sensibilité. Dès l'instant que la tige B reçoit une faible charge électrique, celle-ci est transmise aux feuilles d'or *a*, *b*, lesquelles s'écartent aussitôt en vertu de la répulsion qui a lieu entre deux corps chargés de même électricité. On augmente la sensibilité de l'instrument en ajoutant deux tiges métalliques D, E, fixées à un plateau formant la base de l'appareil et communiquant avec le sol; lors de l'écartement des feuilles *a* et *b*, l'électricité par influence développée dans D et E contribue à augmenter l'angle que forment les deux feuilles entre elles. Souvent aussi on dispose en avant de l'électroscope, et parallèlement au plan *acb*, une portion de cercle divisé, afin d'estimer l'angle d'écartement des deux feuilles d'or.

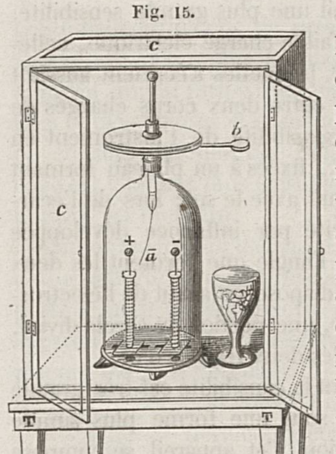
Coulomb a imaginé un appareil dont la sensibilité est très-grande et qui reproduit sous une forme plus simple la balance de torsion. Cet appareil se compose d'un fil de cocon dédoublé dont l'un des bouts est fixé dans les branches d'une pince, et dont l'autre porte un petit fil horizontal en gomme laque à l'une des extrémités duquel est un petit disque en clinquant C. La pince est fixée dans une pièce mobile D que l'on tourne quand on veut placer l'aiguille en gomme laque dans une position déterminée. La tige mobile se trouve au milieu d'un couvercle A en verre qui recouvre une cloche B également en verre, et dans lequel on a pratiqué une échancrure O pour introduire les corps soumis à l'expérience. L'intérieur de la cage est desséché avec de la chaux vive ou du chlorure de calcium placé au fond dans une capsule. On donne une charge électrique à C, et, en approchant de ce disque de clinquant un corps électrisé, on voit quelle est la nature de l'électricité qu'il possède.

Fig. 14.



Bohnenberger, en disposant autrement l'électroscope à feuilles d'or, est parvenu à lui donner une très-grande sensibilité. Cette disposition consiste à n'employer qu'une seule feuille d'or et à faire usage de piles sèches que nous décrirons dans le livre suivant et que nous ne devons considérer, pour l'instant, que comme des colonnes ou des tiges toujours chargées d'une faible quantité d'électricité.

Fig. 15.



L'appareil qui est représenté dans la figure 15 est construit sur ce principe : c'est celui que l'on doit toujours préférer quand on a besoin d'un électroscope très-sensible. (Becquerel.) Il se compose d'une cloche en verre à l'extrémité supérieure de laquelle est une douille pouvant supporter un condensateur (appareil dont on parlera dans le chapitre V). Cette douille ne doit pas reposer immédiatement sur la cloche, mais bien être fixée à une tige de cuivre passant dans un tube de verre recouvert de plusieurs couches de vernis à la gomme laque; c'est ce tube de verre qui est fixé solidement à la cloche. A la base de la tige de cuivre se trouve une feuille d'or *a*, qui, dans les conditions ordinaires, reste verticale. La cloche repose sur un support métallique plan placé sur trois pieds en bois.

Deux piles sèches sont placées dans une position verticale, les pôles contraires c'est-à-dire les extrémités chargées d'électricité contraire en regard. Ces deux piles peuvent s'approcher ou s'éloigner de *a* à l'aide de deux écrous fixés sur le plateau. Aussitôt que la tige, et par conséquent la feuille d'or *a*, a reçu une très-faible quantité d'électricité, elle est attirée par le pôle de la pile sèche qui possède l'électricité contraire, et repoussée par l'autre; ces deux actions s'ajoutent, et cette feuille est alors d'autant plus attirée que la somme d'action est plus considérable.

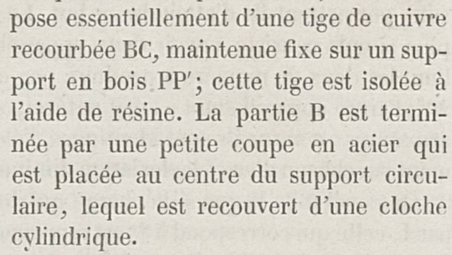
Cet appareil est muni de divers accessoires : une tige *b* portant un anneau peut recevoir différents corps, capsules, etc. Enfin, le tout est placé dans une cage vitrée CT, desséchée à la chaux, afin d'opérer toujours dans un air sec.

Cet électroscope, quoique d'une grande sensibilité, serait insuffisant pour permettre d'apprécier une charge électrique excessivement petite et qui émanerait d'une source fonctionnant continuellement; dans ce cas, il est nécessaire préalablement de l'accumuler en quantité suffisante, à l'aide de deux plateaux condensateurs adaptés à l'appareil, et qui porte, à raison de cela, le nom d'électroscope condensateur. Il faut avoir l'attention de n'employer que des plateaux

condensateurs en verre recouverts de feuilles d'or, ou en cuivre fortement doré; sans cette précaution, les réactions chimiques qui ont lieu entre les doigts humides et les métaux altérables peuvent induire en erreur.

Il existe encore un électroscope très-sensible, utilisé dans les observations d'électricité atmosphérique, comme on le verra plus loin, et qu'il est utile de connaître. Cet appareil, dont le principe est dû à M. Rousseau, a été perfectionné par Peltier; il se compose essentiellement d'une tige de cuivre recourbée BC, maintenue fixe sur un support en bois PP'; cette tige est isolée à l'aide de résine. La partie B est terminée par une petite coupe en acier qui est placée au centre du support circulaire, lequel est recouvert d'une cloche cylindrique.

Fig. 16.



Un petit fil de cuivre *abcd* recourbé est mis au commencement de l'expérience parallèlement à AB. Il est fixé à une petite aiguille verticale dont la pointe repose sur la coupe d'acier. Un contre-poids *a* fait de ce fil une aiguille pouvant se mouvoir avec beaucoup de liberté dans un plan horizontal. On attache dans la partie courbe *abc* un fragment *mn* d'aiguille à coudre préalablement aimanté; cette petite aiguille ramène toujours le fil de cuivre *abcd* dans une position constante. Pour opérer avec cet appareil, on tourne le pied PP' jusqu'à ce que la tige BC soit dans le méridien magnétique et convenablement dirigée. La petite aiguille mobile va se placer parallèlement à cette tige; il suffit alors de présenter un corps électrisé à la boule C pour qu'elle soit repoussée par la tige, qui se charge de même électricité que celle qu'elle possède. L'angle d'écartement est plus ou moins grand, suivant l'intensité électrique.

On trace sur le support horizontal PP' un cercle divisé, ainsi que sur la partie supérieure du cylindre de verre, afin d'estimer, sans erreur de parallaxe, la déviation de la petite aiguille. Pour augmenter la sensibilité de l'appareil on se sert quelquefois d'un petit plateau vertical mobile G, pouvant s'approcher de l'aiguille *abc*. Ce petit plateau communique avec le sol, et au moment de l'électrisation par l'influence due à sa proximité augmente la déviation produite au moyen d'une très-faible charge électrique. On peut encore

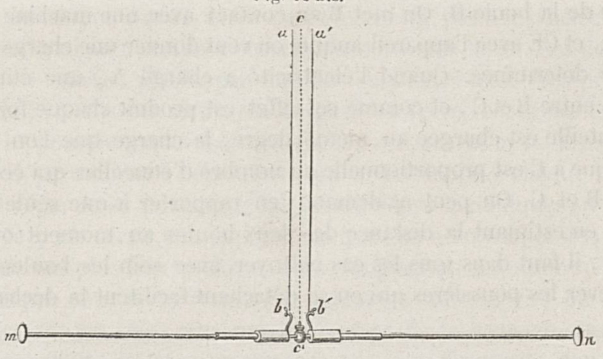
adapter sur C un condensateur, afin d'apprécier des quantités très-faibles d'électricité. En outre de cela, un fil métallique *gh* peut transformer cet appareil en balance de torsion.

Électromètres. Ces appareils en général ne sont autres que des électroscopes gradués à l'aide de tables destinées à comparer les intensités électriques; aussi la plupart des électroscopes que nous venons de décrire, l'électroscope à balles de sureau, celui à feuilles d'or, à aiguille horizontale, gradués au moyen de tables de comparaison, permettent-ils d'atteindre ce but. Le procédé de graduation le plus simple consiste à avoir deux appareils identiques; on électrise l'un des deux de manière à produire par exemple une déviation de 20°; l'autre appareil étant à l'état naturel, on met en contact les deux armatures: comme ils sont identiques, l'électricité se répartit également sur chacun d'eux; la déviation diminue, et devient par exemple 8°. On conclut de là que si la charge qui donnait 20° est représentée par 1, celle qui correspond à 8° est représentée par 1/2. On peut continuer ainsi à dédoubler l'électricité, et, en s'y prenant à plusieurs reprises avec des intensités électriques différentes, on forme une table dans laquelle les déviations de la partie mobile de l'appareil sont en regard des intensités électriques correspondantes. Ce procédé, qui est simple et exact, s'applique à la plupart des électroscopes décrits précédemment.

La balance de torsion, dont il a été question plus haut, est un électromètre d'une grande précision et dont on peut varier la sensibilité suivant la force de torsion du fil employé, mais pourvu qu'on ne dépasse pas la limite d'élasticité de ce fil. M. Harris, pour remédier à l'inconvénient de l'emploi dans la balance de torsion d'un fil de métal dont l'élasticité n'est jamais parfaite, a construit un appareil nommé balance bifilaire, à cause de deux fils de suspension dont on fait usage au lieu d'un seul. La forme extérieure de l'appareil est à peu près la même que celle de la balance de torsion; mais la force de réaction de l'instrument ne provient plus d'aucun principe d'élasticité, mais bien de l'action de la pesanteur.

Lorsqu'une aiguille horizontale *mn* est suspendue à deux fils de soie non tordus *ab*, *a'b'*, placés parallèlement l'un à l'autre, à égale distance des centres *c* et *c'*, et fixés aux deux points *a* et *a'*, elle est dans sa position d'équilibre quand elle est horizontale dans le plan vertical passant par les deux fils. A l'aide de cette disposition, en tournant l'aiguille autour de l'axe imaginaire *cc'*, les lignes de suspension se dévient de la verticale, et la distance *cc'* est

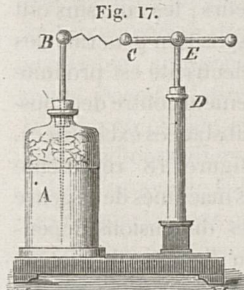
Fig. 16 bis.



moindre. On a donc une force de réaction provenant du poids de l'aiguille, laquelle est transmise pour ainsi dire aux points de suspension, puisque le centre de gravité de la masse s'élève et tend sans cesse à revenir dans sa position première, et se trouve dans une position semblable à celle d'un corps qui tombe suivant un très-petit arc circulaire. D'après cela, si l'on fait osciller l'aiguille, et qu'on observe les effets produits, on peut déterminer, au moyen des formules relatives aux corps oscillants, la nature de la force qui produit les oscillations (*).

L'électromètre de Lane sert à d'autres usages que les appareils précédents. Il permet de communiquer une charge déterminée à un corps conducteur. Il consiste en une bouteille de Leyde A (dont nous parlerons plus loin), isolée sur un plateau MM et dont la garniture intérieure communique avec une boule B. Une autre boule C, de même dimension que la précédente, et placée à l'extrémité d'une tige de cuivre qui se trouve supportée par une tige E D, communique avec la garniture extérieure; la boule C peut être mise en contact ou placée à une distance déter-

Fig. 17.



(*) Le temps d'une oscillation est comme la racine carrée de la longueur des fils de suspension divisée par leur distance respective, et tout à fait indépendant du poids du corps oscillant.

Les oscillations sont isochrones pour tous les angles. A l'aide de ces résultats et de la formule $n = \frac{P \pi^2 a^2}{2 g t^2}$ employée par Coulomb dans ses expériences sur la torsion des fils, on peut en déduire facilement les lois de la force de réaction communiquée au fil. n représente la force perpendiculaire appliquée à l'extrémité d'un bras de levier, pour résister à la force de réaction communiquée au fil. P est le poids du corps suspendu aux fils, g l'intensité de la pesanteur, t le temps d'une oscillation. (Becquerel, *Traité d'électricité*, tome V, 2e partie, page 66.)

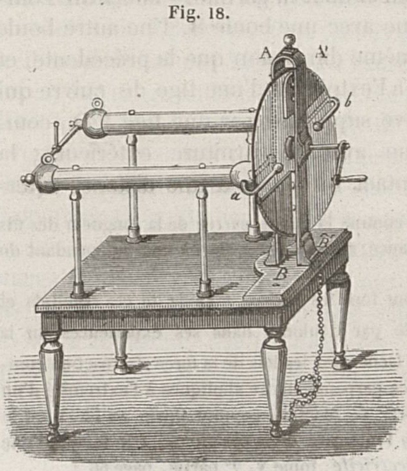
minée de la boule B. On met B en contact avec une machine électrique, et CE avec l'appareil auquel on veut donner une charge électrique déterminée. Quand l'électricité a chargé A, une étincelle éclate entre B et C, et comme cet effet est produit chaque fois que la bouteille est chargée au même degré, la charge que l'on communique à C est proportionnelle au nombre d'étincelles qui éclatent entre B et C. On peut également s'en rapporter à une seule étincelle, en estimant la distance des deux boules au moment où elle éclate; il faut dans tous les cas nettoyer avec soin les boules, afin d'enlever les poussières qui en se détachant facilitent la décharge.

CHAPITRE IV.

Machines électriques.

Machines électriques. Lorsqu'on veut étudier les effets divers produits par l'électricité statique, il est nécessaire de pouvoir en développer un excès assez considérable; on a alors recours aux machines électriques qui dégagent de l'électricité au moyen du frottement. La forme généralement adoptée aujourd'hui est celle qui a été proposée par Ramsden; les conducteurs, les coussins ont reçu depuis quelques modifications, mais la disposition générale des différentes parties est à peu près la même. L'électricité est produite par le frottement d'un plateau de verre en mouvement contre des coussins en peau ou en soie recouverts de diverses substances excitatrices.

Fig. 18.



La figure 18 représente une des machines de ce genre dont les dimensions dépendent du diamètre du plateau en verre, qui varie en général de 30 centim. à $1^{m},8$. Ce plateau est mis en mouvement par une manivelle, et frotte entre deux paires de coussins situés entre les deux montants en bois AB, A'B'; ces coussins communiquent à la terre au moyen d'une chaîne C. Le frotte-

ment développe sur le verre de l'électricité positive; l'électricité négative que prennent les coussins s'écoule dans le sol. Des conducteurs en cuivre, placés par une de leurs extrémités très-près du plateau, sont isolés au moyen de pieds en verre recouverts de vernis à la gomme laque. Les extrémités recourbées *a, b,* armées de pointes, permettent à l'électricité qui se développe à chaque instant sur le verre de se porter sur les conducteurs métalliques, d'où on l'enlève pour servir aux expériences que l'on a en vue, et dont nous indiquerons plus loin quelques-unes. On place aussi autour du verre, de chaque côté de la roue, des gaînes en taffetas ciré ou même simplement en soie, afin que les parties de la roue en verre qui viennent d'être frottées ne perdent pas leur électricité dans l'air, et passent entre les deux surfaces isolantes de la soie avant d'arriver en présence des pointes.

Une machine, pour bien fonctionner, doit remplir un grand nombre de conditions, en supposant même qu'elle soit dans une atmosphère sèche; s'il en était autrement, on chaufferait la pièce, et cette élévation de température diminuerait le degré hygrométrique de l'air. Les conditions à remplir sont relatives, 1° au corps frotté, 2° aux frottoirs, 3° aux conducteurs.

Corps frottés. La roue frottée étant en verre, il faut craindre que son hygroscopicité s'oppose au dégagement de l'électricité. Il faut donc choisir des glaces peu alcalines; les anciens verres sont préférables aux nouveaux à moins qu'on ne les fabrique pour cet usage. Avant d'opérer, on lave le plateau avec de l'alcool ou de l'éther; on obtient ainsi, après quelques instants de frottement, de bien meilleurs effets.

On a essayé de substituer au verre d'autres substances, et dans ces derniers temps on a proposé l'emploi de la gutta-percha; mais l'altération de la matière a forcé d'y renoncer, comme on l'avait fait à l'égard du soufre et de la résine avant d'employer le verre. Le seul inconvénient que présente cette dernière substance est son hygroscopicité.

On met quelquefois deux plateaux de verre à côté l'un de l'autre pour doubler les effets. On peut citer comme machine très-puissante à deux plateaux celle qui a été construite par Van Marum et qui existe au musée de Harlem; elle peut donner des étincelles d'un mètre.

Frottoirs. La forme et la disposition des frottoirs a une grande influence sur l'intensité des effets produits; ils sont en général en

peau et rembourrés en crin. A l'aide d'une vis de pression, on peut modérer leur frottement sur le verre. On n'obtient un maximum d'effet qu'autant que l'on recouvre les coussins de substances excitatrices, qui sont des amalgames ou de l'or musif (deuto-sulfure d'étain). Les amalgames proposés ont la composition suivante en poids :

Étain.	Zinc.	Mercure.	
1...	»	3...	(Cavallo.)
1	»	4...	(Id.)
1.	2	6...	(Singer.)
2	4	7...	(Id.)
2	3	4...	(Amalgame du Conservatoire des arts et métiers.)
1	1	3...	(Id. employé actuellement dans plusieurs établissements.)

Les substances sont broyées, puis appliquées sur les coussins préalablement enduits d'une matière grasse.

L'or musif doit être porphyrisé, lavé, et séché avec grand soin; on l'étend de la même manière.

Les amalgames produisent des effets plus énergiques mais moins durables que l'or musif; cette dernière substance a une action plus constante.

Quelquefois, on enduit le coussin d'amalgame, et on met par dessus de l'or musif. Au lieu de coussins en peau de daim, on fait également usage de coussins employés par Van Marum; ils sont recouverts de soie, et on intercale entre cette étoffe et le bois une lame d'étain, afin d'enlever à chaque instant l'électricité du frottoir; des vis de pression permettent d'exercer un frottement plus ou moins fort contre le verre.

On peut même obtenir de bons résultats en exerçant directement le frottement entre le verre et une lame d'étain collée sur le frottoir.

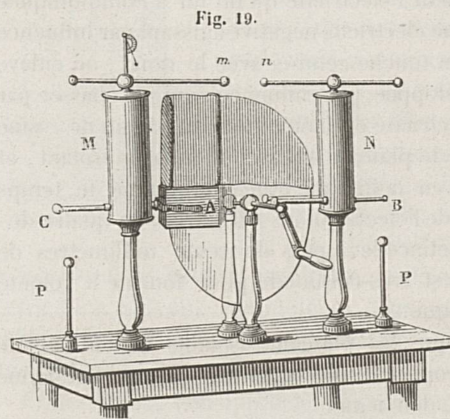
Conducteurs. Les conducteurs sont ordinairement creux, attendu que l'électricité se répand en totalité sur la surface des corps; ils doivent être isolés.

Quelquefois on suspend à l'aide de cordons de soie, au plafond de la pièce où l'on opère, des conducteurs plus étendus, appelés conducteurs secondaires, quand il s'agit de produire une grande quantité d'électricité ayant la même tension que celle de la machine.

Les appareils dont nous venons de parler ne donnent aux conducteurs que l'électricité du verre ou positive. Lorsque l'on veut avoir de l'électricité négative, il faut isoler les frottoirs et les faire com-

muniquer avec des conducteurs ; on forme ainsi d'autres machines qui donnent à volonté l'une ou l'autre des électricités. Van Marum a indiqué une forme d'appareil qui a été longtemps en usage; il en est de même de la machine de Nairne. Nous indiquerons ici celle qui se trouve au cabinet de physique des Arts et métiers, et qui donne des résultats très-satisfaisants sous une petite dimension.

Fig. 19.

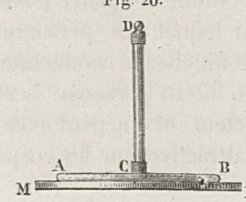


Le frottoir A communique au conducteur M, et l'électricité négative développée dans le frottement se porte sur M en même temps que la positive s'accumule sur N. En mettant les deux boules *m* et *n* en contact, rien ne se produit, car la réunion des électricités se fait à chaque instant par l'intermédiaire de ces boules; mais si elles sont éloignées, chaque cylindre M et N se charge d'électricité contraire. Si l'on veut opérer avec l'une ou avec l'autre des électricités, il faut mettre le cylindre qui reçoit l'électricité que l'on n'emploie pas en communication avec le sol. Pour cela on élève une des deux tiges de cuivre P, P, qui se meuvent à frottement dans des tubes de même métal fixés à la table, en contact avec la boule C ou avec la boule B, afin de faire communiquer à la terre le cylindre auquel on enlève l'électricité.

Nous ferons connaître dans le livre troisième une machine qui peut fournir de l'électricité en très-grande quantité; c'est une chaudière à vapeur isolée et pourvue de divers accessoires.

Electrophore. Il existe encore un appareil très-simple qu'on nomme électrophore, ou porteur d'électricité, qui est fréquemment employé quand on a besoin d'avoir à sa disposition une faible source électrique. Cet appareil se compose d'un plateau de résine MN entouré d'un cercle en bois et reposant sur un plateau de même matière, afin qu'il ne puisse

Fig. 20.



se briser, et d'un autre plateau également en bois AB et d'un diamètre un peu plus petit, mais recouvert d'une feuille d'étain et muni d'un manche isolant en verre CD. On électrise la résine MN en la frottant ou en la frappant huit ou dix fois avec une peau de chat, que l'on tient à la main; elle prend alors l'électricité négative. Pose-t-on sur la résine le plateau conducteur AB, l'électricité négative ne peut être transmise à la feuille d'étain, puisque la résine, très-mauvais conducteur, retient l'électricité qu'on lui a communiquée par frottement. Cette même électricité négative agissant par influence sur le plateau A B, si l'on touche celui-ci avec le doigt, on enlève l'électricité négative développée par influence, qui est chassée par l'action répulsive de l'électricité de même nom du gâteau de résine MN; En enlevant ensuite le plateau AB avec le manche isolant, et lui présentant le doigt, il en jaillit une étincelle. Quand le temps est sec et que le plateau de l'électrophore AB a trois ou quatre décimètres de diamètre, l'étincelle a plus de trente millimètres de longueur. Cet appareil est très-commode pour fournir à volonté une faible charge électrique.

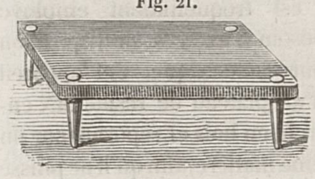
Nous venons de voir que les plateaux isolants étaient faits de résine. On a également proposé les mélanges suivants, qui ont donné de bons effets, surtout le deuxième.

		Kilogr.	Grammes.
	Colophane................	1	»
	Térébenthine de Venise.....	»	125
	Suif.....................	»	15
Ou bien :	Gomme laque..............	»	500
	Colophane................	»	250
	Térébenthine de Venise.....	»	62
	Suif.....................	»	15

Après avoir décrit les machines en usage, nous allons rapporter quelques-unes des expériences que l'on est dans l'habitude de faire pour mettre en évidence le pouvoir conducteur des corps, les attractions et répulsions électriques, etc.

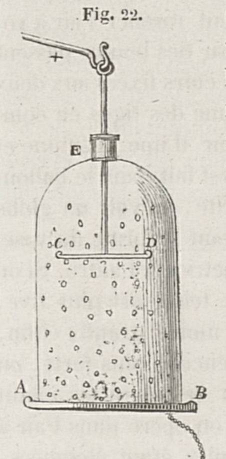
Le tabouret isolant est un tabouret en bois muni de quatre pieds en verre, et sur lequel une personne monte avant de toucher le conducteur d'une machine. Cette personne sert alors de conducteur, et elle peut exercer des actions attractives sur les corps légers, etc.

Fig. 21.



Les effets d'attraction et de répulsion se démontrent facilement en plaçant une cloche en verre AE sur un plateau métallique AB communiquant au sol. Par la tubulure E de la cloche passe à frottement dans une douille une tige en cuivre qui supporte dans l'intérieur de la cloche un plateau métallique CD. On met sur AB des boules de moelle de sureau; on électrise le plateau CD en faisant communiquer la tige avec le conducteur d'une machine électrique. On voit aussitôt toutes les balles sauter dans l'intérieur de la cloche et aller d'un plateau à l'autre. Il est évident qu'elles sont alternativement attirées par le plateau intérieur électrisé et par celui du fond AB, auquel elles cèdent sans cesse leur électricité.

Fig. 22.



La danse des pantins est fondée sur le même principe. On place entre deux plateaux conducteurs, l'un communiquant à une machine, l'autre au sol, des petits pantins en sureau qui vont continuellement de l'un à l'autre.

Étincelles. Si l'on approche des conducteurs d'une machine dont le plateau est en mouvement un conducteur qu'on tient à la main, ou la main elle-même, on en voit jaillir une étincelle. La lumière en est éclatante, et chaque fois qu'elle luit on entend un bruit sec. Si la distance est petite, l'étincelle est faible et il en résulte peu de bruit; si elle est plus grande, les étincelles sont plus longues, mais moins fréquentes; enfin, si les étincelles sont encore plus longues, elles cessent d'être droites et présentent des zigzags. Les premiers observateurs qui virent l'étincelle électrique furent frappés de son apparition et en comparèrent la lumière et la marche à celles de l'éclair. Cette identité a depuis été constatée, et l'on sait maintenant que l'étincelle et le bruit qui l'accompagne reproduisent sur une petite échelle l'éclair et le tonnerre. Ce sujet sera traité spécialement dans la suite de cet ouvrage.

L'électricité qui se transmet sous forme d'étincelles dans l'air s'échappe sous l'apparence de rayons, d'aigrettes, quand on raréfie le milieu qui environne les conducteurs. On peut s'en assurer en opérant avec l'œuf électrique, représenté fig. 23.

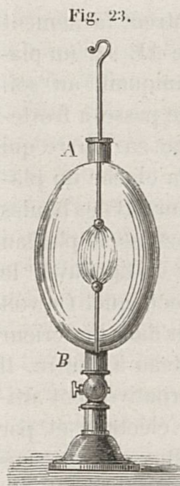


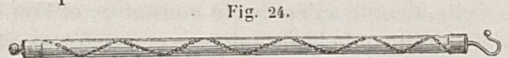
Fig. 23.

Cet appareil se compose d'un ballon de forme ovoïde AB, dans lequel on peut raréfier l'air à volonté. Deux tiges terminées par des boules passent à frottement dans des boîtes à cuirs fixées aux deux douilles A et B. En mettant une des tiges en communication avec le conducteur d'une machine et l'autre avec le sol, si le vide est fait dans le ballon, et qu'on opère dans l'obscurité, on voit un globe de feu, de teinte bleuâtre, ayant la forme du vase, et qui va d'une sphère conductrice à l'autre. Si on fait rentrer un peu d'air, la teinte est plus vive, mais l'espace lumineux est moins grand; enfin, avec une pression intérieure encore plus forte, on aperçoit des coruscations ou des aigrettes allant d'une boule à l'autre. Quand on opère dans l'air à la pression ordinaire les boules étant éloignées, il ne se produit aucune action; si elles sont rapprochées et que la tension électrique soit suffisante, des étincelles éclatent entre elles. On voit par là qu'en diminuant la pression du gaz intérieur, l'étincelle augmente de volume et l'électricité se répand dans un plus grand espace.

Un tube vide, long de deux mètres, met également bien en évidence ce phénomène, car les décharges, qui dans l'air ne donneraient des étincelles que de quelques centimètres, franchissent dans l'air raréfié de grandes distances en se répandant dans une partie de l'espace.

La production des étincelles dans le tube étincelant ou dans les tableaux étincelants montre que la transmission de l'électricité est très-rapide; nous verrons du reste par la suite comment on évalue cette rapidité.

Fig. 24.



Le tube étincelant se compose d'un tube ordinaire dans l'intérieur duquel sont collés des losanges en papier d'étain séparés les uns des autres et dont les pointes sont en regard à une distance assez faible. Une étincelle tirée d'un conducteur touchant à un des losanges extrêmes, à raison de la vitesse excessive de l'électricité, se reproduit presque simultanément dans tous les intervalles et le tube paraît tout en feu par suite de la persistance des impressions lumineuses sur la rétine.

On a construit sur ce principe des tableaux étincelants formés de plaques de verre sur lesquelles des bandes de papier d'étain, convenablement espacées, représentent des figures diverses. Lorsque l'on excite des étincelles à l'une de leurs extrémités, ces figures paraissent éclairées simultanément dans toutes leurs parties.

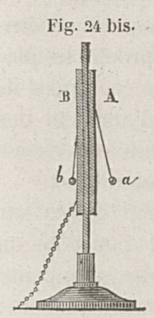
Nous donnerons des exemples d'inflammation et de combustion opérées avec les étincelles, dans les livres consacrés aux actions chimiques et physiques dues à l'électricité.

CHAPITRE V.

Condensateurs.

Condensateurs. Lorsque deux disques métalliques séparés par un plateau de matière isolante, de gomme laque ou de verre, ou seulement par une couche d'air, possèdent l'un et l'autre une quantité égale d'électricité contraire, le plateau intermédiaire s'oppose à leur recomposition, mais non à l'action par influence qu'ils exercent l'un sur l'autre, laquelle masque leur action sur les corps environnants : on dit alors que les électricités sont dissimulées. Toutes les fois que l'action attractive des deux électricités est suffisante pour vaincre la résistance que lui oppose le corps isolant, celui-ci est percé en un ou plusieurs points par l'effet de la décharge. Si l'on établit directement la communication entre les deux disques avec un arc métallique, la recomposition des électricités s'opère immédiatement.

Fig. 24 bis.

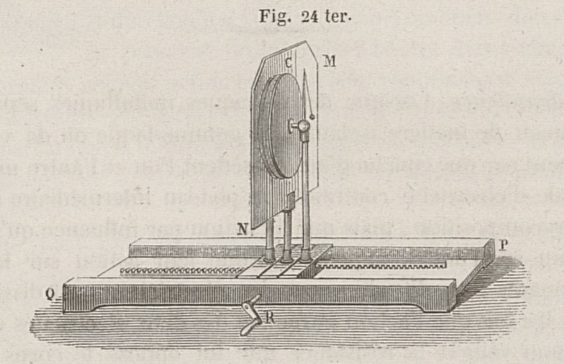


Supposons deux disques A et B, en cuivre ou en étain, séparés par une lame de verre, A étant isolé et B communiquant au sol. Supposons en outre que A communique avec l'un des conducteurs d'une machine qui lui fournisse une certaine quantité d'électricité $+ e$, dépendant de la tension de la machine. Cette quantité d'électricité réagira sur l'électricité naturelle de B, attirera une portion de la négative e', en plus petite quantité que e, à cause de la distance, puis repoussera dans le sol l'électricité

positive ; à son tour cette électricité négative — e' agira sur une portion $+ e''$ de e, de manière à la neutraliser, et en définitive il n'y aura de libre sur A que $e—e''$. Cette quantité d'électricité libre ayant une tension moindre que $+ e$, on pourra avec la machine ajouter une autre quantité d'électricité positive sur le plateau A ; on aura alors une nouvelle décomposition d'électricité naturelle sur B, par conséquent une nouvelle dissimulation, puis il restera libre sur A un autre excès d'électricité. En continuant ainsi, on pourra accumuler sur A une quantité totale d'électricité positive E, telle que l'électricité libre E — E″ sur ce plateau ait une tension égale à celle de la machine ou à $+ e$.

Si la disposition du condensateur offre le moyen de séparer les deux plateaux de la lame isolante, on rendra sensible l'électricité accumulée. L'appareil représenté fig. 24 ter permet d'atteindre ce

Fig. 24 ter.



but. Les deux plateaux C et D sont mobiles à l'aide d'une manivelle R, et peuvent s'écarter de la lame de verre fixe MN. Quand on a chargé ce condensateur, comme on l'a dit plus haut, on enlève la communication du plateau non isolé avec le sol, et on écarte les plateaux ; s'ils sont pourvus de petits pendules électriques, ces derniers divergent aussitôt ; quand on rapproche les plateaux, les pendules reviennent à leur position première ; mais ils peuvent indiquer d'un côté ou de l'autre, ou simultanément des deux côtés, une faible quantité d'électricité libre. Cette expérience met bien en évidence la présence des électricités dissimulées.

Les quantités d'électricité dissimulées sont rarement égales sur les deux faces du condensateur. Il y a en général d'un côté un excès d'électricité libre qui, avec l'électricité dissimulée, compense la distance et maintient dissimulée l'électricité de l'autre plateau ;

si l'on enlève cet excès d'électricité, l'autre disque manifeste alors un léger excès d'électricité libre contraire. Ces décharges successives peuvent être rendues sensibles comme l'indique la disposition de la fig. 24 *bis*, en enlevant la chaîne conductrice qui met B en relation avec le sol, et en examinant la position des petits pendules *ab*, *a'b'*, formés de balles de sureau suspendues à des fils de lin et en communication chacun avec l'un des disques. Ces deux pendules, à l'instant où ils touchent les faces des disques, sont repoussés; mais en touchant l'un des disques, le pendule correspondant retombe, et celui de l'autre se relève comme s'il eût pris une charge nouvelle. Cet effet doit être attribué uniquement à la portion d'électricité qui est devenue libre par la perte que l'autre a éprouvée quand on a touché le plateau. On peut en touchant ainsi successivement les plateaux décharger complétement le condensateur.

La force condensante du condensateur (*) dépend de l'épaisseur de la couche isolante et de la résistance qu'elle oppose à la réunion des électricités dissimulées; d'après les expériences de M. Riess, elle dépend également des dimensions des plateaux. Quant à la quantité totale de l'électricité accumulée, elle est en rapport avec la surface des disques ou avec l'étendue du condensateur. On exprime

(*) Soit m une fraction dépendant de la distance des deux plateaux du condensateur et approchant de l'unité à mesure que cette distance diminue. La quantité d'électricité négative — E' développée sur le plateau B est égale à mE. La quantité d'électricité positive dissimulée est $E'' = mE' = m^2E$. On a donc $E - E'' = E(1 - m^2)$, d'où

$$\frac{E}{E - E''} = \frac{1}{1 - m^2}.$$

Or, E étant la quantité totale d'électricité accumulée sur le plateau A, $E - E''$ sera la quantité d électricité libre, ou celle qui se répandrait sur le plateau, si l'autre plateau B n'existait pas.

Le rapport précédent a été considéré jusqu'ici comme mesurant la puissance condensante du condensateur. Mais, d'après les expériences de M. Riess, ce ne peut être qu'une expression approximative et non une formule exacte, car il semble que l'électricité dissimulée participe à la loi de répartition de l'électricité libre à la surface des corps conducteurs, et dès lors le problème est plus compliqué et ne comporte pas une solution aussi simple

En admettant cette formule comme approximative dans les conditions ordinaires, c'est-à-dire à l'égard de plateaux condensateurs très-étendus, peu épais et très-rapprochés, on voit que ce rapport augmente quand m approche de l'unité; c'est-à-dire que plus les plateaux sont près l'un de l'autre, plus le pouvoir condensant du condensateur est considérable. Mais on ne peut dépasser une certaine limite pour des tensions électriques assez fortes, car la couche isolante ayant une limite de résistance pourrait être perforée.

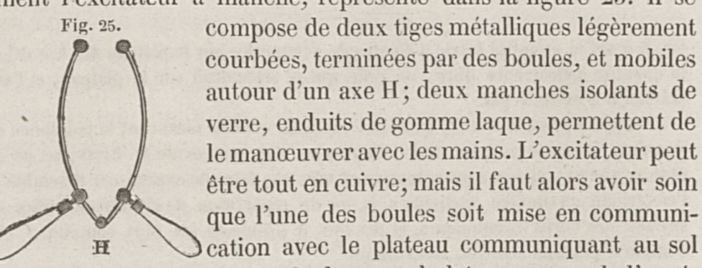
habituellement ces résultats en disant que la quantité d'électricité qu'on peut accumuler est directement proportionnelle à la surface du condensateur et en raison inverse de l'épaisseur de la lame isolante.

Quand on veut accumuler de fortes charges électriques, on prend en général des condensateurs en verre sous forme de carreaux fulminants; néanmoins le verre est quelquefois perforé, s'il est trop mince. On emploie aussi comme isolant intermédiaire du taffetas verni, de la gutta-percha, etc. Au lieu de plateaux métalliques, on se sert de feuilles d'étain que l'on colle sur les deux faces du corps isolant.

Quand il s'agit d'accumuler de l'électricité à très-faible tension, on peut diminuer alors l'épaisseur de la couche isolante et se servir d'une couche très-mince de vernis à la gomme laque interposée entre deux plateaux en cuivre doré, ou en verre doré, rodés l'un sur l'autre. On forme alors l'électromètre condensateur que nous avons décrit page 22 en parlant des électroscopes.

Excitateur. En établissant la communication métallique entre les deux plateaux d'un condensateur chargés d'électricités contraires, on voit une étincelle très-vive et très-brillante, mais plus courte que l'étincelle ordinaire : cet effet provient de ce que l'excès de tension en vertu de laquelle les électricités libres des plateaux se réunissent est peu considérable eu égard à la quantité d'électricité accumulée, mais que la proportion d'électricité qui passe est beaucoup plus grande. Pour opérer cette décharge, on emploie habituellement l'excitateur à manche, représenté dans la figure 25. Il se compose de deux tiges métalliques légèrement courbées, terminées par des boules, et mobiles autour d'un axe H; deux manches isolants de verre, enduits de gomme laque, permettent de le manœuvrer avec les mains. L'excitateur peut être tout en cuivre; mais il faut alors avoir soin que l'une des boules soit mise en communication avec le plateau communiquant au sol avant d'approcher l'autre boule du second plateau: sans cela l'expérimentateur pourrait recevoir une partie de la décharge, et par conséquent une commotion plus ou moins forte dans les bras.

Fig. 25.

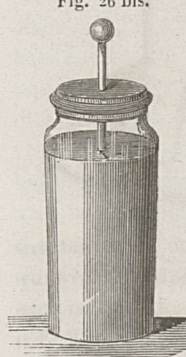


Bouteille de Leyde. Quand on veut donner une grande étendue aux surfaces des condensateurs, on a recours à d'autres appareils dont la construction repose sur le même principe, savoir : la bou-

teille de Leyde et les jarres électriques. La bouteille de Leyde joue un grand rôle dans l'histoire de l'électricité; elle a été découverte avant le condensateur proprement dit, et se compose d'une bouteille en verre AB, revêtue extérieurement d'une feuille d'étain jusqu'à quelques centimètres du goulot; elle est remplie intérieurement de feuilles de clinquant chiffonnées, de grenaille de plomb, ou même de feuilles d'étain collées sur la surface intérieure du verre, enfin d'une substance conductrice quelconque. Le haut de la bouteille est recouvert d'une couche de vernis à la gomme laque. Une tige en laiton C, dont le bout supérieur est recourbé en crochet et terminé par une boule, passe dans le bouchon du goulot pour se rendre dans l'intérieur. Cette bouteille est donc un véritable condensateur dans lequel les parois remplacent le plateau isolant; on donne le nom d'armatures intérieures et extérieures aux deux surfaces conductrices qui le composent. Veut-on la charger, on la prend dans une main par l'armature extérieure, et l'on met en communication le crochet avec une machine électrique. Celle-ci donne continuellement à la surface intérieure de l'électricité positive, et il s'accumule à l'extérieur de l'électricité négative. Aussitôt que l'on établit la communication entre les armatures à l'aide d'un excitateur, il y a décharge électrique. Si la charge est trop forte, souvent l'étincelle passe du crochet à la garniture extérieure; quelquefois, lorsque le verre est trop mince, il est percé, et l'appareil ne peut plus servir.

Fig. 26.

Fig. 26 bis.



On donne à ces appareils des dimensions plus ou moins grandes (fig. 26 bis), ; quand on veut que leur action soit puissante, on construit des jarres garnies extérieurement et intérieurement de papier d'étain, sauf sur les bords qui sont recouverts de vernis à la gomme laque.

Si l'on suspend dans l'air avec un cordon de soie une bouteille de Leyde électrisée, l'électricité successivement libre sur les deux armatures se perd peu à peu, et la bouteille se trouve complétement déchargée au bout de plus ou moins de temps, suivant le degré d'humidité de l'atmosphère.

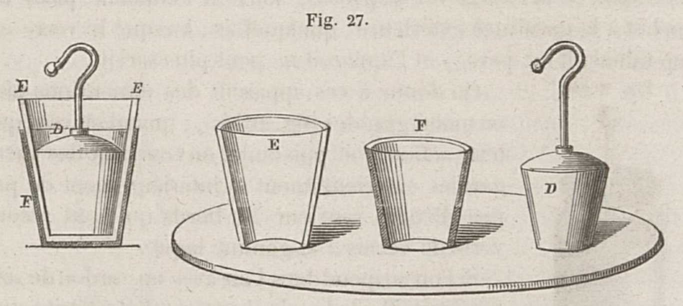
En plaçant cet appareil sur un plateau de résine et en le prenant ensuite par le crochet, on rend libre sur la garniture extérieure

une certaine quantité d'électricité négative. On se sert souvent de ce procédé pour avoir de l'électricité de ce nom.

Quand on a déchargé une bouteille de Leyde ou un condensateur quelconque à l'aide d'un excitateur, si l'on attend quelques instants et qu'on rapproche de nouveau le bouton d'un excitateur du crochet de la bouteille, on obtient une nouvelle étincelle moins forte que la précédente; en attendant encore quelque temps, on peut recueillir successivement plusieurs décharges qui vont toujours en s'affaiblissant et qui sont dues aux résidus de l'électricité. Il faut se mettre en garde contre ces résidus dans les fortes batteries électriques, lesquels peuvent donner des commotions assez vives. On explique cet effet en admettant que le verre se laisse pénétrer peu à peu jusqu'à une certaine profondeur par les électricités dissimulées qui s'attirent mutuellement sur les armatures. Alors, au moment de la première décharge, ces portions des électricités qui ont pénétré dans le verre ne peuvent se recombiner immédiatement, et ce n'est qu'au bout de quelques instants qu'on peut obtenir une étincelle, en mettant en communication de nouveau les deux armatures.

L'expérience suivante, qui est très-curieuse, met en évidence, si ce n'est cette pénétration d'une portion de l'électricité dans le verre jusqu'à une certaine profondeur, du moins l'existence des électricités dissimulées sur les deux faces du corps isolant qui sépare les armatures.

Fig. 27.

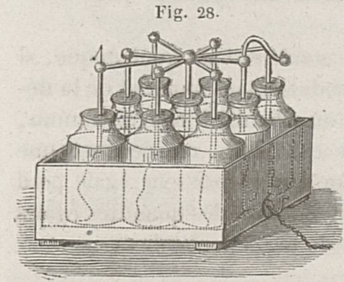


On dispose une bouteille de Leyde de façon que les armatures puissent être séparées de la lame isolante. L'armature intérieure est une bouteille en zinc ou en cuivre D; la lame isolante, un vase en verre évasé E; et l'armature extérieure, un vase en zinc F. En tenant cette bouteille à la main par la panse F, on peut la charger comme à l'ordinaire. Si alors on la place sur un plateau de résine

qu'on enlève d'une part avec un crochet de verre la bouteille en zinc D, puis d'autre part le vase en verre E, on peut toucher impunément D et F. Place-t-on de nouveau les armatures comme précédemment, on peut obtenir une décharge avec la bouteille. Ces effets montrent bien que les électricités dissimulées se trouvaient sur le verre de chaque côté du vase E.

Batteries. Si l'on veut se procurer des décharges considérables, on réunit ensemble plusieurs bouteilles de dimensions plus ou moins grandes, en faisant communiquer ensemble les armatures intérieures avec des tiges de métal, et les garnitures extérieures avec une lame d'étain qui revêt le fond de la caisse où sont toutes les bouteilles. Telles sont les batteries électriques.

Fig. 28.



La figure 28 représente une batterie de ce genre. Au lieu de bouteilles de petite dimension, on peut prendre des jarres qui, ayant une surface de verre plus considérable, donnent lieu à la condensation d'une plus grande quantité d'électricité. Ces appareils se chargent comme les bouteilles de Leyde ordinaires. Pour juger de leur charge, on met un petit électroscope à cadran sur le conducteur de la machine électrique ou sur la batterie elle-même. Au commencement de l'expérience, le pendule est au repos, parce que toute l'électricité qui arrive est dissimulée aussitôt par l'effet de la batterie; mais peu à peu il s'élève, et l'on juge des diverses charges par l'angle d'écart qui fait connaître l'excès d'électricité libre. On a observé que, pour une épaisseur de verre constante, la force de la batterie croît proportionnellement à l'étendue de la surface : ainsi, vingt décimètres carrés condensent vingt fois plus d'électricité qu'un seul. Quand on opère à l'aide de batteries électriques d'une grande étendue, il faut un certain temps avec la machine électrique pour en opérer la charge. La décharge d'une batterie agit avec une telle énergie sur l'économie animale, qu'il est nécessaire de prendre des précautions lorsqu'on en fait usage.

On a proposé d'appliquer aux batteries la charge par cascade. On suspend plusieurs bouteilles ou batteries les unes au-dessus des autres, de sorte que la première communique directement au conducteur de la machine, tandis que son armature extérieure touche à l'ar-

mature intérieure de la seconde ; l'armature extérieure de celle-ci est mise en relation avec la garniture intérieure de la troisième, et ainsi de suite. On voit qu'en même temps que la première bouteille ou batterie se charge, les autres se chargent également ; une fois ce point atteint, on supprime les communications entre les armatures et on met en relation séparément toutes les garnitures intérieures et toutes les garnitures extérieures ; puis on opère la décharge comme dans les conditions ordinaires. Ce procédé est peu usité aujourd'hui.

Pour décharger les batteries électriques il est préférable d'employer l'excitateur à deux branches (fig. 25) au lieu d'une chaîne de métal tenue à la main, comme on le fait à l'égard d'une simple bouteille de Leyde, à moins de lui donner une grosseur plus considérable.

Quand on opère la décharge d'un condensateur quelconque, si l'on suit les effets de tension qui se produisent au moment de la décharge, depuis l'armature intérieure où elle est à son maximum, jusqu'à l'armature extérieure où elle est nulle, on reconnaît que l'électricité passant par un fil conducteur d'épaisseur égale perd peu à peu de sa tension, de sorte qu'il disparaît des quantités égales d'électricité sur des longueurs égales de fil. (Knochenhauer.)

CHAPITRE VI.

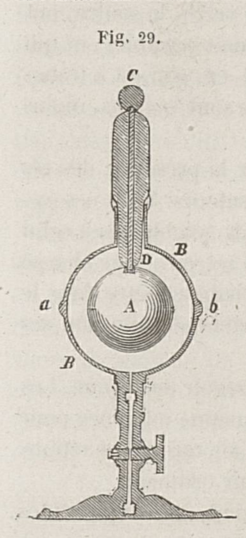
Induction. Propagation de l'électricité.

Pouvoir inducteur. Si un corps électrisé se trouve à une certaine distance d'un autre corps à l'état naturel, il se produit une action par influence, qui varie lorsque différentes substances ou milieux se trouvent interposés entre les deux corps. On distingue deux cas : 1° lorsque l'action se borne à l'influence seule ; 2° quand la tension électrique est suffisante pour produire une étincelle. Nous allons indiquer d'abord les effets produits dans le premier cas et qui constituent les phénomènes d'induction statique ; nous parlerons ensuite de la résistance que les milieux opposent aux décharges électriques.

Si le milieu interposé est conducteur, l'action par influence est nulle, puisque la transmission de l'électricité s'opère directement

d'un corps à l'autre. L'influence ne s'exerce que lorsque le corps est mauvais conducteur ou isolant.

Fig. 29.



Pour analyser les effets produits au travers de différentes substances, d'après M. Faraday, on opère comme il suit : on place dans un vase sphérique de métal B (fig. 29) une boule métallique isolée A à l'aide d'une grosse tige en gomme laque CD ; une sphère en cuivre C communique au moyen d'une petite tige métallique fixée au centre de la tige en gomme laque à la boule A, de sorte qu'en électrisant C, A se trouve chargé de la même espèce d'électricité, laquelle ne peut se transmettre à la sphère extérieure B que par influence au travers du milieu qui les sépare et qui se trouve dans l'intérieur de B. L'appareil est tellement disposé que l'on peut employer comme milieu intermédiaire de la gomme laque, du verre, des gaz plus ou moins raréfiés, etc. ; à cet effet, le vase se sépare en deux hémisphères suivant le grand cercle *ab*, et est muni de robinets à la partie inférieure.

Afin de comparer les effets d'induction des différents milieux, on opère avec deux appareils exactement semblables, et on se place à proximité d'une balance de torsion, pour apprécier l'intensité des différentes charges électriques. On met dans un des appareils de l'air ; dans l'autre, des hémisphères de gomme laque ou de verre. On donne une charge à la boule intérieure de l'appareil plein d'air, dont on mesure la tension à l'aide de la balance de torsion ; puis on fait communiquer les deux appareils par les boules C touchant aux conducteurs intérieurs. On mesure ensuite après le contact les charges des deux boules A en les enlevant des vases et les portant dans la balance de torsion. Il est évident que l'électricité se répartit sur chacune d'elles et agit par influence sur le vase sphérique enveloppant et qui communique au sol ; elles prennent alors d'autant plus d'électricité que le pouvoir d'induction de la substance isolante est plus grand. En opérant ainsi, M. Faraday est arrivé aux conclusions suivantes :

1° L'induction ou action par influence paraît être une action des particules contiguës des corps isolants, par l'intermédiaire de la-

quelle la puissance électrique est transmise à distance; on doit donc la considérer comme une polarité des particules du corps interposé.

2° Les meilleurs isolants solides, la laque, le verre, le soufre, ont des propriétés conductrices faibles il est vrai, mais sensibles, et qui permettent à l'électricité de les pénétrer, tout en servant à transmettre les actions par influence ; plus les corps sont isolants, moins la charge sensible pénètre dans l'intérieur.

Cette conductibilité est rendue manifeste par la présence des résidus, ainsi qu'on l'a dit à propos des condensateurs. Dans ces expériences, après avoir déchargé un des appareils semblables à celui de la fig. 29, au bout de quelques minutes on retrouve une charge qui montre qu'une certaine portion de l'électricité pénètre dans le milieu (soit gomme laque, soit verre) et revient ensuite sur ses pas pour donner une charge plus faible.

3° Les gaz possèdent à peu près le même pouvoir inducteur. Les variations dans la pression ou la densité n'ont aucune influence pour modifier cette propriété générale. Ainsi dans l'air raréfié les actions par influence se transmettent comme dans l'air ordinaire.

4° Les pouvoirs inducteurs des corps peuvent être représentés par les nombres suivants :

Air et gaz à diverses pressions.......	1
Flint-glass.......................	1,76
Gomme laque.....................	2
Soufre............................	2,24

Ainsi, au travers du soufre, l'action par influence produite par une même charge électrique est plus forte qu'au travers d'une même épaisseur d'air.

Les physiciens qui se sont occupés de cette question après M. Faraday, et parmi lesquels nous citerons MM. Harris, Matteucci et Masson, ont trouvé des résultats peu différents. On doit seulement faire remarquer que si dans les gaz raréfiés le pouvoir inducteur est le même que dans les gaz à la pression ordinaire, dans le vide l'induction devrait également avoir lieu; or, il est généralement admis que dans le vide absolu l'électricité ne pourrait se transmettre, parce qu'il n'y aurait plus de particules matérielles pour permettre à la polarité de s'établir. Mais pour traiter cette question il est nécessaire d'avoir recours à d'autres phénomènes que nous ne pouvons décrire maintenant; nous la reprendrons dans le livre suivant, en traitant du pouvoir conducteur des corps.

Résistance à la décharge électrique; pouvoir isolant. Lorsque l'action par influence qui s'exerce entre deux corps chargés d'électricité contraire est suffisante pour vaincre la résistance qui s'oppose à la réunion des deux électricités, il y a décharge électrique. Dans les corps solides, quand cet effet se produit, il y a quelquefois rupture du corps intermédiaire; dans les liquides et les gaz la mobilité des particules est cause que l'équilibre moléculaire n'est pas détruit, et que les mêmes effets peuvent se reproduire à diverses reprises.

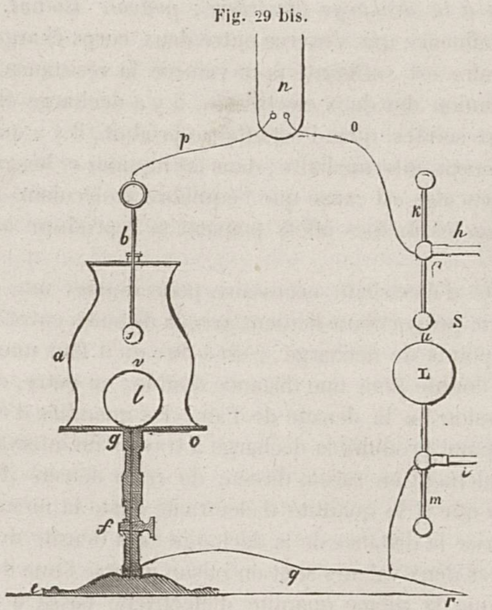
La quantité d'électricité nécessaire pour donner une décharge dans l'air varie proportionnellement avec la distance entre les balles ou entre les points de décharge, c'est-à-dire qu'il faut une quantité d'électricité double pour une distance double; en outre, en faisant varier la pression ou la densité de l'air, les quantités d'électricité nécessaires pour produire la décharge à travers un intervalle constant sont également en raison directe de cette densité (Harris). Il résulte de là que si la quantité d'électricité reste la même, tandis qu'on fait varier la distance de la décharge et la densité de l'air, on trouve que ces deux valeurs sont en raison inverse l'une de l'autre, c'est-à-dire que la même quantité d'électricité passe à une distance double quand l'air est raréfié de moitié.

Les variations de température dans l'air ne produisent aucun changement dans la quantité d'électricité nécessaire pour opérer une décharge au travers d'un espace donné.

Voici l'appareil dont M. Faraday a fait usage pour comparer les résistances que présentent l'air et diverses substances à la décharge électrique (fig. 29 bis, page suivante).

a est un vase de verre, fermé au sommet et au fond au moyen de deux plaques de cuivre; *b* est une tige métallique mobile passant dans une boîte à cuir et terminée en bas par une petite boule de cuivre *s* et au-dessus par un anneau. La plaque inférieure repose sur un tube de cuivre muni d'une douille et d'un robinet d'arrêt *f*; une boule de cuivre *l* est fixée sur la plaque inférieure; le verre du vase est recouvert d'une couche de vernis à la gomme laque. Au moyen du tube on peut faire le vide dans l'intérieur et y introduire du gaz. L'autre partie de l'appareil consiste en deux supports isolants *h*, *i*, auxquels sont attachées deux boules de cuivre à travers lesquelles passent des tiges mobiles *m*, *k*, terminées par des boules de cuivre. *n* est l'extrémité d'un conducteur isolé qui reçoit l'électricité positive ou négative d'une machine. *p* et *o* sont deux fils

Fig. 29 bis.



de communication; qr est un fil de métal qui, unissant les pieds des appareils, communique avec un conducteur de décharge. Au moyen de cet arrangement, la décharge peut passer entre s et l ou entre S et L, à une distance fixe, selon qu'elle trouve plus de facilité à franchir l'intervalle v que l'intervalle u. On introduit successivement un gaz dans le vase, et l'on cherche à balancer la décharge en cet endroit avec celle qui s'opère dans l'air; mais quand l'intervalle u est assez petit, toute la décharge peut y passer; en le rendant plus grand, la décharge a lieu en v. Quand la résistance est la même en u qu'en v, la décharge a lieu tantôt d'un côté, tantôt de l'autre; dès lors, en prenant une distance fixe, celle de u par exemple, on peut comparer la résistance ou pouvoir isolant de l'air à la résistance d'un autre gaz.

On a opéré successivement avec l'air, l'oxygène, l'azote, l'hydrogène, le gaz acide carbonique, le gaz oléfiant, le gaz de la houille et le gaz acide chlorhydrique. Dans les expériences, u était constamment égal à 0,62 de pouce anglais et les sphères avaient les dimensions suivantes :

$$s = 0{,}93;\ S = 0{,}96;\ l = 2{,}02;\ L = 1{,}95.$$

Les boules s et S pouvaient être rendues positives ou négatives,

en faisant communiquer *n* avec l'un des deux conducteurs de la machine. Voici les résultats obtenus en notant l'intervalle le plus petit, le plus grand, et le moyen en *v*, intervalle qui n'est jamais constant, attendu qu'à la limite la circonstance la plus légère détermine la décharge dans l'air ou dans le vase.

Dans les résultats suivants, les intervalles sont exprimés en fractions de pouce :

	Plus petite distance.	Plus grande distance.	Moyenne.
Air *s* et S positif	0,60	0,79	0,695
Id. *s* et S négatif	0,59	0,68	0,635
Oxygène *s* et S positif	0,41	0,60	0,505
Id. *s* et S négatif	0,50	0,52	0,510
Azote *s* et S positif	0,55	0,68	0,615
Id. *s* et S négatif	0,59	0,70	0,645
Hydrogène *s* et S positif	0,30	0,44	0,370
Id. *s* et S négatif	0,25	0,30	0,275
Acide carbonique *s* et S positif	0,56	0,72	0,640
Id. *s* et S négatif	0,58	0,60	0,590
Gaz oléfiant *s* et S positif	0,64	0,86	0,750
Id. *s* et S négatif	0,69	0,77	0,730
Acide carbonique *s* et S positif	0,37	0,61	0,490
Id. *s* et S négatif	0,47	0,58	0,725
Acide chlorhydrique *s* et S positif	0,89	1,32	1,105
Id. *s* et S négatif	0,67	0,75	0,720

Ces résultats montrent qu'il y a une différence très-remarquable et constante dans la direction de la décharge, quand l'électricité des boules *s* et S change de signe. La différence entre la plus grande et la plus petite distance est toujours plus considérable quand les petites boules sont positives que lorsqu'elles sont négatives ; c'est ce qu'indiquent les nombres suivants :

	Positif.	Négatif.
Dans l'air	0,19	0,09
Oxygène	0,19	0,02
Azote	0,13	0,11
Hydrogène	0,14	0,05
Acide carbonique	0,16	0,02
Gaz oléfiant	0,22	0,08
Gaz de la houille	0,24	0,12
Gaz chlorhydrique	0,43	0,08

En prenant l'intervalle moyen pour la mesure du pouvoir isolant

des gaz, ces résultats, qui présentent de grandes différences, montrent néanmoins que sous la même pression, et les petites balles étant chargées positivement, le gaz acide chlorhydrique a trois fois le pouvoir isolant du gaz hydrogène, et presque le double de celui de l'oxygène, de l'azote et de l'air.

Les différences observées dans les pouvoirs isolants des gaz dépendent donc de leur nature et non pas de leur densité. Car dans les tableaux précédents l'ordre relatif au pouvoir isolant n'est pas en rapport avec celui qui résulterait de la comparaison des poids spécifiques.

D'un autre côté, M. Harris a reconnu qu'en raréfiant l'air aux deux tiers de sa densité ordinaire, il a les mêmes pouvoirs isolants que l'oxygène, quoiqu'il n'ait ni la même densité ni la même pression.

Nous ferons remarquer encore que les séries positives et négatives des intervalles moyens ne donnent pas la même différence. Les nombres négatifs sont inférieurs aux nombres positifs; mais l'ordre des résultats positifs et négatifs n'est pas le même: ainsi dans l'air, l'hydrogène, l'acide carbonique, le gaz oléfiant et l'acide chlorhydrique, la tension électrique s'élève plus haut quand la plus petite balle est rendue positive que lorsqu'elle est négative, tandis que dans l'oxygène, l'azote et le gaz de la houille, c'est l'inverse.

Nous avions montré précédemment que les gaz possèdent tous sensiblement la même capacité inductive, les résultats que nous venons de rapporter prouvent que ces mêmes gaz n'ont pas le même pouvoir isolant: ces deux propriétés sont donc essentiellement distinctes l'une de l'autre.

Quand on passe des corps gazeux aux corps liquides ou solides, si l'on augmente la tension électrique jusqu'à ce que la décharge ait lieu entre deux conducteurs, on trouve qu'elle doit être plus élevée dans les liquides que dans les gaz, et plus élevée encore dans les solides. Ces effets tendent donc à prouver que le pouvoir isolant est en rapport avec le nombre de particules, puisqu'il est d'autant plus grand que les corps sur lesquels on opère sont plus denses.

D'après M. Masson, les nombres suivants expriment les résistances à la décharge électrique de différentes substances placées entre des boules de même diamètre :

Air	1
Hydrogène	0,98
Acide carbonique	1,13

Éther................	entre 7 et 8
Eau..................	entre 12 et 13
Alcool...............	entre 12 et 14
Essence de térébenthine..	entre 15 et 16

Déperdition de l'électricité par les supports et les milieux environnants. Un corps conducteur électrisé et isolé perd assez rapidement son électricité dans un temps donné. Deux causes concourent à cette perte : la première est la nature des supports, qui n'isolent jamais parfaitement ; la seconde provient de ce que le corps électrisé est enveloppé par l'air atmosphérique ou par un milieu plus ou moins isolant suivant la nature de ses parties constituantes et la quantité d'eau qui s'y trouve.

Coulomb a cherché à déterminer par l'expérience comment varie la déperdition de l'électricité dans différentes conditions. Il s'est servi à cet effet de la balance de torsion, qui permet d'estimer à chaque instant la tension électrique d'un corps électrisé fixé sur différents supports et placé au milieu d'atmosphères diverses. Parmi les résultats obtenus, nous citerons les suivants :

1° Des supports commencent à isoler parfaitement toutes les fois que la réaction électrique du corps est proportionnelle à la racine carrée de leur longueur. Ainsi, dans le même état de l'air, un support d'une longueur quadruple isole parfaitement une quantité double d'électricité.

2° Lorsque la tension électrique d'un corps n'est pas très-considérable, un petit cylindre de cire d'Espagne ou de gomme laque de 1 millimètre de diamètre et de 40 à 45 millimètres de longueur suffit pour isoler parfaitement une balle de sureau de 11 à 13 millimètres de diamètre.

3° Lorsque l'air est sec, un fil de soie très-fin, passé dans de la cire d'Espagne bouillante et ne formant qu'un cylindre d'un quart de millimètre de diamètre et de 13 à 16 centimètres de hauteur, remplit le même objet.

4° Un fil de verre tiré à la lampe d'émailleur, de 13 à 14 centimètres de longueur, n'isole la balle que dans des jours très-secs, et lorsqu'elle est chargée d'un très-faible degré d'électricité.

Coulomb a trouvé en outre que la perte d'électricité dans les mêmes conditions de l'atmosphère est proportionnelle à son intensité.

M. Matteucci, en examinant la déperdition électrique qui s'opère entre deux boules séparées par un milieu gazeux, a été conduit à une

conclusion différente ; il a trouvé que dans l'air, le gaz hydrogène et l'acide carbonique sec, la perte de l'électricité n'est pas proportionnelle à son intensité, et qu'elle s'éloigne d'autant plus de celle qui serait donnée par la loi de Coulomb, que les charges électriques avec lesquelles on opère sont plus grandes, et qu'on augmente davantage la distance à laquelle les deux boules électriques sont placées. M. Matteucci pense en outre que dans les gaz, et pour de faibles charges électriques, il n'est pas exact d'admettre que les molécules gazeuses sont attirées par les corps électrisés, les touchent, et en sont ensuite repoussées pour céder la place à d'autres molécules ; il suppose qu'il arrive avec les molécules gazeuses ce que l'on observe avec les solides et les liquides, savoir, que ces molécules sont attirées par le corps électrisé, restent adhérentes à ce corps en attirant d'autres molécules gazeuses autour d'elles, de manière à propager l'électricité de proche en proche comme dans les corps solides ; ce n'est que dans le cas de fortes charges électriques que les molécules gazeuses peuvent être mises en mouvement, comme cela arrive pour les solides et les liquides. Des expériences que nous indiquerons dans les livres II et IV semblent prouver d'une autre manière et dans d'autres circonstances la conductibilité propre des molécules gazeuses.

Conductibilité des corps mauvais conducteurs. Nous avons vu que l'électricité s'écoule avec facilité dans les métaux et les liquides, c'est-à-dire dans les corps bons conducteurs de l'électricité ; les différences que ces substances présentent à cet égard ne peuvent être accusées qu'en opérant à l'aide des courants électriques, comme on le verra dans le livre suivant. Mais il n'en est pas de même pour les corps médiocres conducteurs ; si leurs molécules permettent à l'électricité de se propager de proche en proche, plus ou moins facilement suivant leur nature, les effets d'attraction et de répulsion et les phénomènes lumineux peuvent alors nous donner des indications sur la facilité qu'ils possèdent de transmettre l'électricité.

M. Rousseau a mis à profit cette propriété dans le but d'apprécier les différents degrés de sophistication de différents corps, et en particulier des huiles. Il a fait usage pour cela d'un électroscope analogue à celui qui est représenté fig. 16, et qui permet d'estimer la plus ou moins grande charge électrique d'un corps d'après la déviation d'une aiguille de cuivre chassée horizontalement de sa position par rapport à une tige fixe. L'action répulsive de l'électricité,

ainsi que nous l'avons dit, est contrebalancée par l'action attractive du globe sur une petite aiguille aimantée placée au centre de l'aiguille conductrice mobile. La tige de l'électroscope est terminée par une petite coupe sphérique dans laquelle on place successivement le corps isolant dont on veut déterminer le pouvoir conducteur. La source électrique constante est une des extrémités d'une pile sèche terminée par une petite boule de cuivre qui plonge au centre de la coupe sphérique. Ainsi l'électricité ne peut passer de la pile sèche à l'électroscope que par l'intermédiaire du corps isolant contenu dans la coupe. Quand le corps isole complétement, l'aiguille de l'appareil reste au zéro; mais comme l'électricité pénètre peu à peu au travers des différents corps, tels que le verre, le soufre, la laque, etc., suivant le degré de perméabilité, l'aiguille se dévie plus ou moins rapidement. L'appareil ainsi disposé a reçu le nom de *diagomètre*.

M. Rousseau a pu ainsi observer qu'avec des corps conducteurs placés dans la petite coupe l'aiguille se portait à sa déviation maximum à peu près de la même manière, dans un temps très-court; mais quand le corps était mauvais conducteur, alors l'aiguille n'arrivait à la même déviation qu'après un temps plus ou moins long. En comparant entre elles les différentes huiles, il a reconnu que l'huile d'olive présentait des propriétés isolantes plus grandes que les autres; aussi la petite épaisseur de cette substance placée dans la coupe prolongeait jusqu'à quarante minutes le temps nécessaire pour obtenir la déviation maximum de l'aiguille, quand l'huile d'olive était très-pure. L'huile de pavot ou autre produisait le même effet en vingt-sept secondes. En mettant seulement $\frac{1}{100}$ d'huile étrangère dans l'huile d'olive, on réduisait au quart le temps nécessaire à la déviation; il était donc de dix minutes.

M. Rousseau a fait également une application du diagomètre à quelques autres produits commerciaux et pharmaceutiques; il a observé des anomalies qui mettent sur la voie pour signaler leur sophistication. Il est à regretter que ces résultats curieux n'aient pas été suivis, et qu'on n'ait pas encore tiré parti de ces premières tentatives de l'application de la conductibilité électrique à l'analyse des différents produits. On doit remarquer que dans une foule de circonstances les propriétés physiques des corps sont invoquées comme conduisant sûrement et rapidement à leur composition; ainsi la pesanteur spécifique, la polarisation circulaire, etc., sont

utilisées journellement dans les arts ; pourquoi n'en serait-il pas de même de la conductibilité électrique ?

Conductibilité superficielle des corps. Lorsque l'électricité s'écoule à la surface des corps, suivant leur nature, leur mode de cristallisation, elle ne passe pas avec une égale facilité dans toutes les directions. M. de Sénarmont a fait sur ce sujet des expériences fort curieuses dont nous allons parler, et qui conduisent à des résultats très-intéressants pour l'étude des propriétés physiques des corps cristallisés.

Pour observer ces effets, on découpe dans une feuille d'étain un trou exactement circulaire, et on la colle sur la surface plane d'un corps mauvais conducteur, de manière à la recouvrir entièrement. On place normalement au centre de l'ouverture circulaire de l'armature, et sur la surface même de ce corps, une pointe métallique isolée mise en communication avec une source d'électricité. Quand celle-ci fonctionne, l'électricité ne peut s'écouler qu'en se dirigeant vers la circonférence, sur une surface non conductrice. En supposant cette surface parfaitement homogène, il n'y a pas de motif pour que l'électricité se porte vers tel ou tel point de la circonférence ; mais il n'en est pas de même si, par suite d'arrangements moléculaires, les diverses parties superficielles ne possèdent pas la même conductibilité.

Dans le principe, on provoquait une explosion entre la pointe centrale et la circonférence métallique, à l'aide d'une petite batterie. La décharge laissait sur le cristal une trace persistante de son passage; cette trace, sur quelques cristaux tels que le gypse, était à peu près normale au clivage sec et vitreux. Ce mode, dans certaines circonstances, donnant des effets qui disparaissent dans les anomalies accidentelles, on opère dans l'air raréfié sous le récipient de la machine pneumatique. A la vérité, le passage de l'électricité sur la surface du cristal ne laisse pas de traces permanentes, mais il se produit dans l'obscurité une lueur qui permet de suivre toutes les particularités du phénomène.

Voici ce que l'on observe : avec les cristaux du système régulier, l'électricité s'échappe uniformément de la pointe centrale, de manière à couvrir la surface du cercle d'une lueur uniforme. L'effet paraît être le même avec les cristaux prismatiques à base carrée et rhomboédriques, mais seulement quand la face d'expérimentation est perpendiculaire à l'axe de symétrie.

Avec des cristaux de tout autre système, la lueur se montre suivant deux directions opposées et forme un diamètre lumineux qui s'oriente dans un azimut fixe, ou s'épanouit un peu en éventail et se balance par quelques oscillations légères à droite ou à gauche de sa véritable direction.

Si le récipient de la machine pneumatique renferme une certaine quantité d'air, on voit de petites étincelles brillantes se mêler à la lueur violacée permanente.

Les deux électricités n'agissent pas de la même manière. Lorsque la pointe centrale est positive il se produit des effets bien nets; ces effets sont complétement indéterminés avec la pointe rendue négative. L'électricité négative s'est toujours comportée, dans les expériences de M. Sénarmont, à l'égard d'un cristal de nature quelconque, comme l'électricité positive sur les cristaux du système régulier.

Tous les cristaux ne sont pas également propres à produire ces phénomènes, même avec l'électricité positive; il existe entre les effets des différences qui sont très-grandes et qu'il faut rapporter soit à l'énergie très-diverse avec laquelle agit la force directrice, soit à l'imperfection de la méthode expérimentale, qui ne permet pas d'observer de légères inégalités. On conçoit que l'état de la surface doit intervenir dans les effets produits : si la surface est unie, comme cela arrive lorsque le clivage est net, l'orientation est régulière; mais elle cesse de l'être si cette surface est rugueuse, striée, rayée, dépolie ou polie artificiellement. Les stries et aspérités naturelles ne paraissent avoir une influence bien sensible que lorsqu'elles sont très-prononcées. Il est donc nécessaire d'opérer, si l'on veut avoir des résultats comparables, sur des faces naturelles ou nouvellement clivées.

M. de Sénarmont, qui a soumis à l'expérience un grand nombre de cristaux appartenant à tous les systèmes cristallins, est arrivé aux conséquences suivantes :

1° Dans les cristaux du système régulier et dans les corps homogènes, la conductibilité superficielle est égale sur toutes les faces et dans tous les sens.

2° Avec les cristaux du système prismatique à base carrée et rhomboédrique, la conductibilité est égale en tous sens sur les faces normales à l'axe de symétrie. Sur les faces parallèles à cet axe, il existe une direction de conductibilité maximum qui lui est parallèle ou perpendiculaire. Sur les faces inclinées à cet axe, il

existe une direction de conductibilité superficielle maximum parallèle ou perpendiculaire à la trace de la section principale sur la face que l'on considère.

3° A l'égard des cristaux des autres systèmes, une face quelconque possède une direction fixe de conductibilité maximum. Si la face contient dans son plan un ou deux axes de symétrie, la direction de conductibilité maximum ne saurait être prévue.

M. Wiedemann s'est servi du procédé suivant pour déterminer la conductibilité électrique superficielle des cristaux dans différentes directions : on saupoudre une plaque de verre ou de résine d'une poussière fine peu conductrice, telle que celle de lycopode, le minium, etc.; on fixe normalement à une plaque, au moyen d'un support semblable, une aiguille à coudre, la pointe en bas; on électrise cette aiguille en la touchant avec le bouton d'une bouteille de Leyde, électrisée positivement. La poudre s'écarte uniformément de la pointe électrisée dans tous les sens; il en résulte une surface nue circulaire, traversée par des rayons.

En substituant à la lame de verre la face d'un cristal, une lame de gypse par exemple, la poussière ne s'écarte plus uniformément dans tous les sens de la pointe; elle s'éloigne surtout dans deux directions diamétralement opposées, et moins dans les directions normales à celles-ci. L'aire découverte est à peu près elliptique, et le rapport du grand au petit axe est de 2 ou 3 : 1 ; tandis que sur le verre la figure est circulaire. Cette expérience prouve que sur le gypse l'électricité se meut plus facilement dans un sens perpendiculaire à l'axe principal que dans toute autre direction. En faisant arriver par la pointe de l'électricité négative, les figures sont très-petites et mal définies.

En soumettant à l'expérience un certain nombre de cristaux, on a reconnu qu'avec la strontiane sulfatée, sur une lame parallèle au clivage facile, le grand diamètre de la figure électrique se confond avec la petite diagonale du parallélogramme formé par les deux clivages inclinés l'un de l'autre de 78°. La baryte sulfatée se comporte de même; sur les faces d'un prisme d'aragonite la figure électrique est allongée dans le sens de l'axe principal. Avec le quartz l'expérience ne réussit que sur des faces parfaitement unies; la figure produite est nettement allongée normalement à l'axe principal, etc. Enfin, l'électricité se répand plus facilement parallèlement à l'axe principal sur l'aragonite, l'apathite, le spath calcaire et la tourmaline ; au contraire elle se propage avec plus de facilité norma-

lement à cet axe, sur l'acétate de chaux et de cuivre, la strontiane sulfatée et la baryte sulfatée, le gypse, le feldspath et l'épidote.

En rapprochant ces phénomènes des propriétés optiques de ces cristaux, M. Wiedemann arrive à cette conséquence, que les corps meilleurs conducteurs de l'électricité dans le sens de leur axe principal sont optiquement négatifs, et que ceux qui jouissent de la propriété contraire, à l'exception du feldspath, sont optiquement positifs. Il semblerait résulter de là que l'électricité se propage dans les cristaux plus rapidement dans la direction suivant laquelle la propagation lumineuse est relativement la plus rapide; mais quant à présent on ne peut savoir à quoi s'en tenir au juste sur ce sujet, car les expériences sur la conductibilité superficielle ne permettent d'en tirer aucune conséquence relativement à la conductibilité propre de la substance qui constitue les cristaux. Les effets observés paraissent dépendre de la manière dont sont groupées les molécules sur la surface d'expérimentation, puisque le poli ou une altération quelconque la modifie. Par exemple, si les cristaux rudimentaires lors de leur groupement présentent leurs angles dans une certaine direction, il est presque certain que ces saillies, invisibles à l'aide de nos appareils, faciliteront l'écoulement de l'électricité dans cette direction. Ce qui rend probable cette explication, c'est ce fait que le spath d'Islande dépoli cesse d'être électrique par pression, par cela même que sa surface acquiert une légère conductibilité. (Becquerel.) Il est digne de remarque que les effets de conductibilité superficielle ont de l'analogie avec les propriétés optiques et calorifiques des minéraux, dans ce sens que dans tous ces phénomènes on retrouve l'influence des axes de symétrie égaux ou inégaux, ce qui prouve que ces phénomènes dépendent uniquement de l'arrangement moléculaire.

LIVRE II.

ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE. PHÉNOMÈNES GÉNÉRAUX.

CHAPITRE PREMIER.

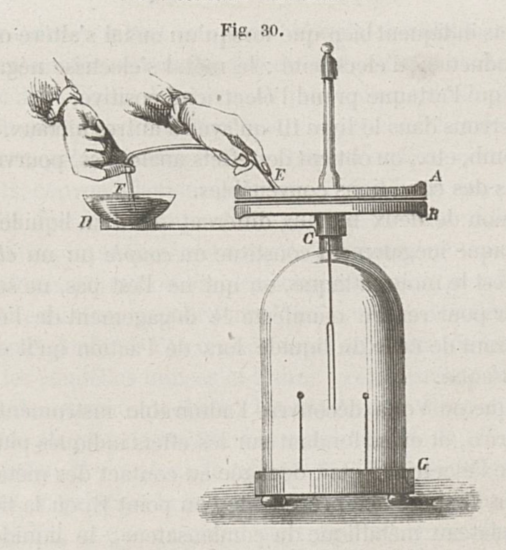
Courants électriques dus aux actions chimiques. Principes des piles.

Dans le livre précédent il n'a été question que des phénomènes que l'électricité présente lorsqu'elle est en équilibre à la surface des corps ou à l'état *statique ;* on a vu que lorsqu'elle se transmet d'un corps à un autre au moment du passage dans l'air, il se produit une étincelle; mais quand ce passage a lieu au travers des solides et des liquides, on observe d'autres effets ; ce sont précisément ces effets que nous allons étudier dans ce livre.

Quand l'électricité chemine ainsi dans les corps, elle est dite *en mouvement* ou à l'état *dynamique;* elle donne lieu alors aux *courants électriques*. Les différences qui existent dans les états d'équilibre et de mouvement de l'électricité proviennent de ce que dans les phénomènes dépendant de l'électricité statique les électricités peuvent s'accumuler sur les corps et acquérir une certaine *tension*, tandis que dans ceux dont il va être question elles cheminent continuellement au travers des conducteurs, ne s'accumulent pas sur leur surface, de sorte que leur tension est infiniment plus faible.

On n'étudie pas les actions des courants avec les machines électriques précédemment décrites, la quantité d'électricité qu'elles fourniraient ne serait pas assez considérable. On fait usage d'appareils fondés sur les effets dont nous allons parler.

Fig. 30.



On adapte une tige métallique horizontale CD au plateau inférieur d'un électromètre condensateur à feuilles d'or CG, et on termine cette tige par un anneau D, de façon à pouvoir placer sur cet anneau une capsule en platine, dans laquelle on verse de l'eau acidulée avec une ou deux gouttes d'acide sulfurique. On plonge une lame de zinc EF par l'une des extrémités dans l'eau très-légèrement acidulée de la capsule, en ayant soin qu'elle ne touche pas la capsule elle-même ; l'autre extrémité de la tige de zinc EF est mise en relation avec le plateau supérieur A du condensateur. En enlevant la tige de zinc immédiatement après le contact, et séparant les deux plateaux l'un de l'autre, on trouve que les feuilles d'or divergent en vertu d'un excès d'électricité positive. Le plateau supérieur, qui touchait au zinc, prend l'électricité négative.

En mettant la capsule sur le plateau supérieur A, et répétant la même expérience, mais en faisant toucher le plateau inférieur B avec la tige de zinc, on obtient des effets analogues mais inverses.

En substituant à la lame de zinc une lame de platine, aucun effet n'a lieu ; de même que lorsqu'on emploie simultanément une lame de zinc et une capsule de même métal. Il est nécessaire pour que l'effet se produise qu'un des deux métaux soit attaqué par le liquide, ou, s'ils le sont tous deux, qu'ils le soient inégalement. S'il n'y avait pas de liquide interposé entre les deux métaux, il n'y aurait aucune action produite.

Ces effets indiquent bien que lorsqu'un métal s'altère ou s'oxyde, il y a production d'électricité : le métal s'électrise négativement, le liquide qui l'attaque prend l'électricité positive.

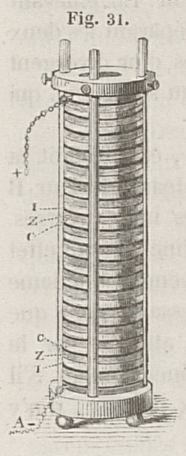
Nous verrons dans le livre III qu'avec d'autres métaux, tels que le fer, le plomb, etc., on obtient des effets analogues, pourvu qu'on les place dans des conditions convenables.

La réunion de deux métaux différents et d'un liquide interposé qui les attaque inégalement constitue un *couple* ou un *élément*. Le métal qui est le moins attaqué, ou qui ne l'est pas, ne sert que de conducteur pour rendre manifeste le dégagement de l'électricité, en s'emparant de celle du liquide lors de l'action qu'il exerce sur le métal attaqué.

A l'époque où Volta découvrit l'admirable instrument que nous allons décrire, et en se fondant sur les effets indiqués plus haut, il pensait que l'électricité était dégagée au contact des métaux, c'est-à-dire, dans l'expérience précédente, au point E, où la tige de zinc touche le plateau métallique du condensateur ; le liquide, suivant lui, n'agissait que comme conducteur ; mais toutes les découvertes modernes ont donné raison à la théorie du dégagement de l'électricité dans les actions chimiques ; c'est pour ce motif que nous l'adoptons comme base des explications que nous allons donner.

Pile voltaïque. La pile voltaïque, dont le nom rappelle son immortel auteur, est formée de la réunion de couples ou d'éléments disposés de différentes manières. Volta lui donna d'abord la disposition d'une pile composée de rondelles superposées entre des colonnes de verre : de là est venu le nom générique de tous les instruments de ce genre. Pour former cet appareil, on procède comme il suit : on place entre trois colonnes de verre un premier disque de zinc Z par exemple, auquel est soudé un fil de cuivre A ; sur ce disque on pose une rondelle de drap humectée d'eau acidulée par l'acide sulfurique au $\frac{1}{20}$ ou au $\frac{1}{30}$ à peu près, puis après la rondelle un disque de cuivre C. Si l'on fait toucher Z et C aux deux plateaux du condensateur décrit plus haut, on obtient une légère charge indiquant que le zinc a pris l'électricité négative, le cuivre la positive, par ce motif que ces deux disques en présence de la rondelle humide constituent un *couple*. Mais si au-dessus du

Fig. 31.

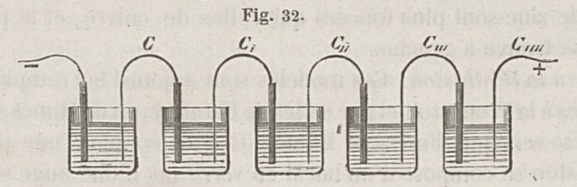


disque de cuivre on met un second couple semblable au premier, c'est-à-dire composé d'un disque de zinc, d'une rondelle de drap humide et d'un disque de cuivre, et qu'on place ensuite un troisième couple, un quatrième, un cinquième, etc., et ainsi de suite, on trouve qu'avec une *pile à colonne* ainsi composée d'un certain nombre d'éléments, convenablement isolée et terminée aux deux extrémités par des fils de cuivre, on peut charger plus fortement le condensateur qu'en employant un seul couple. La charge obtenue est d'autant plus forte que le nombre des couples est plus grand, et l'excès de tension est même proportionnel au nombre des éléments de la pile, comme Coulomb l'a constaté avec la balance de torsion. Dans la figure les rondelles minces et noires I représentent les rondelles humides; les disques ombrés, les plaques de zinc; et les disques clairs C, les plaques de cuivre. Les extrémités de la pile ont reçu le nom de *pôles*. Il y a donc le pôle positif et le pôle négatif.

Telle est en principe la première disposition de l'appareil dû au génie de Volta, et que ce grand physicien fit connaître en 1800 à l'Académie des sciences, appareil qui a été bien modifié depuis, et qui produit des effets extraordinaires d'aimantation, de chaleur, de lumière, de décompositions et de recompositions chimiques. Le dégagement de l'électricité se produit incontestablement à la surface de séparation du liquide et du métal oxydable, et l'effet est le même qu'en employant un seul élément; seulement, les actions s'ajoutent et *l'excès de tension augmente avec le nombre des éléments*. Au lieu de zinc et de cuivre, on pourrait se servir d'autres métaux et faire usage de divers liquides conducteurs; mais comme nous ne donnons dans ce livre que les phénomènes généraux de la pile, ayant l'intention de traiter dans le livre III la théorie des différents instruments en usage aujourd'hui, il n'est question ici que des piles analogues à celle de Volta.

Pile à couronne. La forme de la pile à colonne était trop incommode pour qu'elle pût subsister longtemps; un des principaux inconvénients provenait de ce que la pression occasionnée par le poids des disques exprimait le liquide des rondelles humides et diminuait

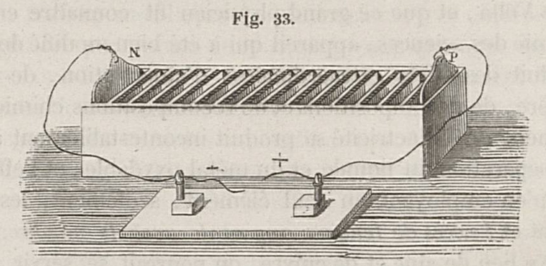
Fig. 32.



peu à peu l'action de la pile. La forme la plus simple consistait à placer séparément les parties humides de l'appareil et les portions métalliques; aussi a-t-on eu de bons effets avec la pile à *couronnes de tasses*. Cette pile se compose de vases en verre pleins d'eau acidulée par l'acide sulfurique au vingtième ou au trentième, et placés à côté les uns des autres; dans chacun de ces vases plonge l'un des bouts d'une lame mixte formée par la réunion de deux lames de cuivre et de zinc, comme l'indique la figure 32. Chaque vase avec sa dissolution et ses lames de zinc et de cuivre forme un couple ou un élément. Le pôle négatif se trouve à l'extrémité du dernier zinc ou à gauche du lecteur; le pôle positif à droite.

Piles à auges. La pile à couronnes, quoique d'une disposition simple, est cependant incommode à cause des manipulations assez longues qu'elle occasionne. On y a remédié au moyen de piles à auges se chargeant et se déchargeant assez rapidement et qui furent considérées comme un progrès.

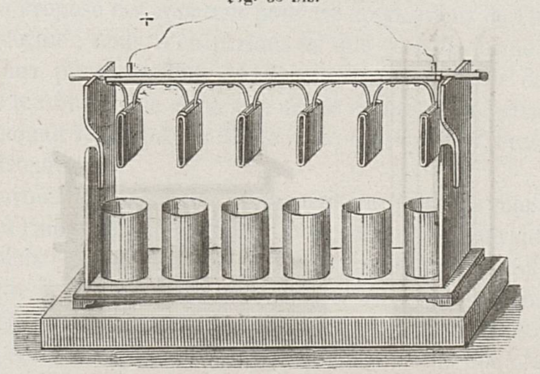
Fig. 33.



Une auge en bois renferme des couples formés de plaques de cuivre et de zinc soudées par une de leurs faces; ces doubles plaques sont placées verticalement et parallèlement les unes aux autres, de manière à ce que la face zinc de l'une regarde la face cuivre de l'autre. Les bords sont mastiqués contre les parois de l'auge, et l'intervalle compris entre deux couples est rempli d'une certaine quantité d'eau acidulée; la pile est alors chargée en vertu du principe dont il a été question précédemment et elle fonctionne aussitôt qu'elle est remplie du liquide conducteur. Dans la figure les plaques de zinc sont plus foncées que celles de cuivre, et le pôle négatif se trouve à gauche.

Pile à la Wollaston. Ces modèles sont aujourd'hui remplacés par les piles à la Wollaston et par celles de Faraday, ou de Muncke, quand on ne se sert que d'un seul liquide. Chaque couple d'une pile à la Wollaston se compose d'un bocal en verre ou d'une auge séparée,

Fig. 33 bis.

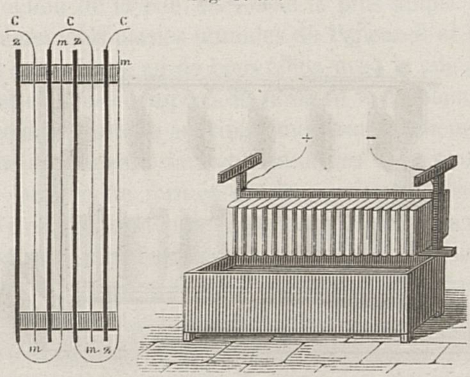


renfermant l'eau acidulée, et d'une lame de cuivre reployée sur elle-même de manière à entourer avec ses deux faces une plaque de zinc. Les deux lames métalliques sont tenues à distance à l'aide de morceaux de bois et le zinc de chaque couple communique avec le cuivre du couple voisin au moyen d'une lame de cuivre fixée à une traverse de bois placée au-dessus. En réunissant plusieurs éléments, on forme une pile qui est d'un emploi commode en ce que l'on retire facilement les couples des bocaux quand on n'a pas besoin de faire fonctionner la pile.

Souvent on ne se sert que d'un seul élément à la Wollaston d'une surface assez grande. On a substitué à ce couple isolé un couple en hélice dont la surface est plus étendue et qui est destiné à fournir une grande quantité d'électricité à faible tension. On le forme en roulant autour d'un cylindre en bois deux lames, l'une de cuivre, l'autre de zinc, mais de façon à ce qu'elles restent séparées l'une de l'autre par du drap ou des morceaux de bois. On met ce couple en activité en le plongeant dans un tonneau rempli d'eau acidulée.

Pile de Muncke. MM. Faraday et Muncke ont employé une disposition analogue à celle de Wollaston, mais avec cette distinction que les éléments ont moins de surface et plongent tous dans la même auge. La figure 33 *ter* représente une pile de Muncke de soixante éléments. Pour la faire fonctionner il suffit de la faire plonger dans l'auge remplie d'eau acidulée. La différence de conductibilité des métaux et des liquides fait que l'on perd peu à faire baigner tous les éléments dans la même dissolution. Chaque lame de cuivre est séparée des lames de zinc à l'aide de petits morceaux de liége *m*, comme l'indique la partie de la figure où est représentée une coupe

Fig. 33 ter.



en plan horizontal de trois éléments. On voit que la disposition des zincs *z* et des cuivres *c* est telle qu'un zinc est placé entre deux cuivres, et *vice versa*.

Cet instrument est d'un emploi facile, et donne des effets énergiques au moment où l'on plonge les couples dans le liquide ; mais l'action s'affaiblit rapidement.

Piles en chaînes. Nous indiquerons encore la forme de piles adoptée par M. Pulvermacher, et qui peut être fort commode pour obtenir des effets de tension considérables.

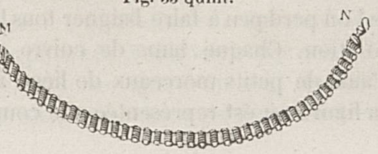
Fig. 33 quat.



Chaque couple se compose d'un petit cylindre en bois AB, dont les dimensions varient depuis deux centimètres de longueur jusqu'à cinq ou six, et de cinq à dix millimètres de diamètre. Deux fils métalliques, l'un en zinc *aa'*, l'autre en laiton *bb'*, sont enroulés en hélice autour de ce petit cylindre, mais parallèlement à un demi-millimètre de distance et sans se toucher. Le premier aboutit à deux crochets *a*, *a'* en laiton fixés dans le bois, et le deuxième à deux crochets *b*, *b'*. En plongeant ce système dans du vinaigre ordinaire, les deux métaux et le bois humide constituent un couple voltaïque qui cesse de fonctionner quand le bois est sec.

Si on réunit cinquante à soixante éléments semblables en les accrochant l'un à l'autre par les pôles de nom contraire, on forme une chaîne MN qui est une véritable pile voltaïque. Au lieu de les disposer en chaîne, on peut placer ces petits cylindres parallèlement

Fig. 33 quint.



dans des boîtes en verre ou en bois, afin d'avoir des piles d'un petit volume et composées d'un très-grand nombre d'éléments. M. Pulvermacher a proposé ces appareils pour les applications de l'électricité à la médecine; nous n'en parlons ici que comme forme nouvelle donnée aux piles, et d'un emploi facile pour avoir de grands effets de tension, mais avec une faible quantité d'électricité; car si on attaquait vivement les fils de zinc, l'instrument serait promptement détruit.

Nous avons fait connaître seulement jusqu'ici les piles les plus simples à l'aide desquelles on peut produire des courants d'électricité; mais elles présentent les mêmes causes de diminution d'intensité que la pile voltaïque primitive. Elles sont maintenant remplacées par les piles à courant constant dont il sera question dans le livre III. Nous donnerons encore un autre genre de pile n'ayant pas reçu d'application importante, mais qui met bien en évidence les effets résultant de la tension électrique produite à chaque extrémité quand on augmente le nombre des éléments. Nous voulons parler des piles improprement appelées piles sèches.

Piles sèches. Nous avons dit qu'une pile ne pouvait fonctionner qu'au détriment d'un des métaux qui s'altérait peu à peu en présence du liquide intermédiaire. Quelque temps après la découverte de Volta on chercha à ne pas employer de liquide actif; on n'y parvint pas complétement, mais on obtint des appareils disposés comme on va le dire : MM. Hachette et Desormes remplacèrent d'abord le liquide dans les piles ordinaires par la colle d'amidon. Deluc, quelques années après, forma une colonne composée de disques de zinc et de papier doré d'un côté seulement, entassés les uns sur les autres, le zinc en contact avec la face dorée. L'humidité du papier suffisait pour charger la pile; c'est donc à tort qu'on leur donna le nom de piles sèches. Zamboni, en 1812, apporta quelques perfectionnements à l'appareil de Deluc; ce sont les appareils construits suivant les indications de ce dernier que l'on emploie maintenant. On entasse, en les pressant fortement les uns contre les autres, des milliers de disques de papier, dont l'une des faces est étamée, et l'autre recouverte d'une couche très-mince de peroxyde de manganèse broyé avec un mélage de farine et de lait. L'humidité du papier sert encore à établir la circulation d'électricité qui, en raison du peu de conductibilité du papier, donne une charge aux deux extrémités de la pile plus lentement que dans les piles ordinaires. Les piles de ce genre cessent de fonctionner au bout

d'un certain temps, quand le papier a perdu toute son humidité. On ralentit habituellement cette déperdition en coulant du soufre autour de la pile sèche et ne laissant à nu que les deux extrémités. On peut, à l'aide de ces piles, charger facilement un condensateur, et en obtenir même des étincelles. L'excès de tension étant proportionnel au nombre des éléments de la pile est plus considérable que dans les piles ordinaires; mais la quantité d'électricité produite étant très-petite, les autres effets sont très-faibles et même souvent inappréciables. C'est à raison de cela que ces piles n'ont servi jusqu'ici qu'à produire des mouvements continus au moyen de faibles attractions et répulsions qu'exercent les électricités accumulées aux deux pôles. Ces mouvements finissent toujours par s'arrêter au bout d'un temps plus ou moins long. On a aussi employé les piles sèches, comme nous l'avons vu plus haut, pour augmenter la sensibilité de l'électromètre condensateur. C'est là une de ses applications les plus utiles.

L'action des piles ne se borne pas à donner aux fils qui touchent à leurs extrémités le pouvoir d'attirer faiblement les corps légers qu'on leur présente. Si une personne se mouille préalablement les mains avec de l'eau salée, et qu'elle touche simultanément par chaque main les extrémités d'une pile à auges d'une quarantaine d'éléments, aussitôt elle reçoit une légère secousse, comme si ses mains servaient à décharger une petite bouteille de Leyde. En outre un fil très-fin de platine peut être porté au rouge ou même fondu. Il se manifeste également un grand nombre de phénomènes qui seront étudiés plus tard, et qui indiquent qu'au moment de la fermeture du circuit d'une pile, il se produit une circulation continuelle d'électricité.

Nous devons donner ici quelques définitions qui reviendront dans le cours de cet ouvrage. Lorsque l'on ferme le circuit d'une pile avec des fils métalliques ou des corps conducteurs, on dit alors que ces corps qui servent à la recomposition des deux électricités sont parcourus par un *courant électrique*.

Sens du courant. On définit habituellement le sens du courant par la direction que suit l'électricité en allant du pôle positif au pôle négatif. Cela ne veut pas dire que le flux d'électricité ait lieu uniquement dans ce sens ; car, d'après ce que nous avons dit dans le livre Ier, on ne sait rien de positif quant à l'origine du principe en vertu duquel les effets électriques se manifestent. On ne prétend nullement que le mouvement ait lieu plutôt du pôle + au pôle —, que du pôle — au pôle +; on est convenu seulement de

lui donner un sens pour définir différents phénomènes qui tiennent à cette direction et dont il sera question dans la suite de cet ouvrage.

Pôles ou électrodes. Les deux extrémités d'une pile ont reçu le nom de *pôles*; on dit alors le pôle positif ou le pôle négatif, suivant le côté par lequel débouche l'électricité positive ou l'électricité négative. Lorsque l'on fait arriver un courant électrique dans une dissolution à l'aide de deux fils ou de deux lames en communication avec les extrémités d'une pile, les portions des fils ou des lames plongées dans le liquide portent aussi le nom de pôles. On donne également à ces conducteurs le nom d'*électrodes:* il y a donc à chaque pile l'électrode négative et l'électrode positive.

Tension, intensité, densité. Nous avons encore à faire connaître quelques dénominations usitées, telles que *tension*, *intensité*, *densité*, appliquées aux courants électriques. Le nom de *tension* indique le degré de réaction électrique dû à la répulsion des électricités du même nom, et la facilité avec laquelle un courant peut franchir l'espace qui sépare deux conducteurs. Dans les piles, la tension est proportionnelle au nombre des éléments, ainsi que nous l'avons vu; une pile qui doit donner de l'électricité de tension doit donc être composée d'un grand nombre de couples (plusieurs centaines). L'*intensité électrique* au contraire dépend de la quantité d'électricité qui passe dans un temps donné, abstraction faite de la tension. Enfin, quelquefois on se sert de la dénomination de *densité électrique* pour indiquer la quantité d'électricité qui traverse une étendue déterminée d'un conducteur dans l'unité de temps; ainsi dans deux fils de cuivre de diamètre différent soudés bout à bout et laissant circuler le même courant, l'intensité électrique et la tension seront les mêmes, mais la densité électrique sera plus forte dans le fil dont le diamètre est moindre.

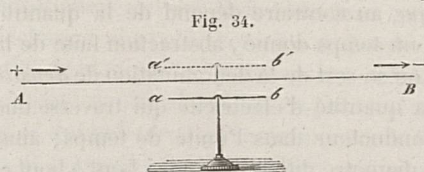
CHAPITRE II.

Action des courants électriques sur l'aiguille aimantée. Multiplicateurs, boussoles et galvanomètres.

Action des courants sur l'aiguille aimantée. Lorsque les fils métalliques sont parcourus par un courant électrique, ils jouissent de la faculté d'agir sur une aiguille aimantée placée à distance. Oersted découvrit en 1820 cette propriété remarquable qui fut le point de départ de l'électro-magnétisme et de toutes les applications de cette partie de l'électricité aux arts et à l'industrie. Nous n'en parlerons ici que pour arriver à décrire les multiplicateurs et les galvanomètres, dont on a besoin pour étudier le dégagement de l'électricité.

Voici dans quelles conditions on observe l'action réciproque des courants électriques et des aimants. Supposons un fil de cuivre AB placé au-dessus d'une aiguille aimantée *ab* et dans sa direction. Si ce fil joint les deux extrémités d'une pile, il est parcouru par un courant électrique, et aussitôt le pôle nord de l'aiguille, suivant le sens du courant, est chassé à droite ou à gauche du fil, et l'aiguille tend à se mettre en croix avec ce dernier. Si l'aiguille est au-dessus du fil en *a'b'*, le pôle nord est chassé dans une position opposée. Vient-on à placer l'aiguille à droite ou à gauche du fil sur le même plan horizontal que lui, elle s'incline dans un sens ou dans un autre. Si, l'aiguille étant dans un position fixe, on fait passer successivement le courant électrique dans les deux sens, alors l'aiguille se dévie chaque fois dans une direction opposée.

Fig. 34.



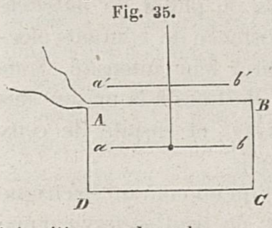
Ampère a donné un moyen facile de se souvenir du sens dans lequel l'aiguille est déviée. Supposons, dit-il, une personne couchée sur le fil conducteur AB de manière que l'électricité positive lui entre par les pieds, et la négative par la tête ; supposons en

outre que cette personne, placée en face de l'aiguille parallèle au fil, la regarde ; le pôle austral (sud) de l'aiguille sera toujours rejeté à sa gauche.

Nous ne faisons que citer le fait découvert par Oersted, sans indiquer comment varie l'action avec la distance et quelles sont les conséquences qu'on peut en déduire ; ce sujet sera traité dans le tome III. Pour l'instant, nous ne considérons que le fait fondamental conduisant à la construction des galvanomètres.

Multiplicateurs. Nous avons supposé le fil longitudinal ; mais, si on le ploie en rectangle ABCD (fig. 35), et que l'aiguille *ab* soit suspendue dans son intérieur, il est facile de voir que les quatre côtés du rectangle agissent sur l'aiguille de manière à la faire dévier dans le même sens et que par conséquent leur action s'ajoute. En effet, pour les deux côtés AB, CD, le fil est bien dans le premier cas au-dessus de l'aiguille, et dans le second au-dessous ; mais, comme les courants sont en sens inverse à cause de la manière dont le fil est ployé, l'aiguille est chassée dans le même sens. Quant aux côtés BC AD, il en est de même : en appliquant la règle d'Ampère, on voit facilement que les actions s'ajoutent. Ainsi une aiguille placée au milieu d'un fil ABCD ployé en rectangle est déviée beaucoup plus vivement que si un seul côté du rectangle agissait ; quant à l'aiguille *a' b'* placée au-dessus et représentée sur la figure, nous en parlerons plus loin à propos du galvanomètre.

Fig. 35.



Si autour d'un cadre en bois rectangulaire on enroule un fil conducteur de manière à lui faire faire vingt, trente, quarante circonvolutions, en ayant soin d'isoler les différentes parties du fil, alors un courant électrique circulant dans le fil agira sur une aiguille aimantée placée au milieu du cadre, vingt, trente, quarante fois plus vivement. Il est donc facile de comprendre comment un courant électrique circulant dans un fil longitudinal et qui serait incapable d'agir sur une aiguille aimantée, peut donner une action appréciable quand elle se trouve multipliée par le nombre de circonvolutions formées par le fil replié sur lui-même. Pour isoler les diverses parties du fil, on le recouvre de soie ou de coton, et, quand on veut un isolement plus parfait, on l'enduit ensuite de vernis à la gomme laque, ou de gutta-percha si son diamètre est un peu fort.

On conçoit également qu'en employant un fil conducteur circu-

laire, au lieu d'un fil rectangulaire, chaque partie agira dans le même sens sur une aiguille suspendue au centre, et que dès lors un instrument dans lequel le fil sera enroulé suivant des circonférences, au lieu de l'être suivant des rectangles, donnera des résultats analogues.

Le multiplicateur a été construit d'après le principe que nous venons d'indiquer par Schweiger; depuis il a été modifié suivant les expériences que l'on a eu en vue, et a même reçu de grands perfectionnements. On a donné le nom de *boussoles* aux appareils destinés à accuser et à mesurer l'action de courants électriques assez énergiques, et celui de *galvanoscopes* ou plutôt de *galvanomètres* à ceux qui servent à indiquer l'existence de courants électriques beaucoup plus faibles et à mesurer leur intensité. Nous parlerons en premier lieu des appareils destinés à la mesure des courants électriques d'une certaine intensité, et ensuite de ceux qui sont destinés à l'étude de faibles courants.

Si l'on a seulement pour but de s'assurer qu'un courant électrique d'une certaine intensité traverse un circuit, on peut se servir d'une aiguille aimantée portée sur un pivot, ou même d'une petite boussole que l'on place sur un ruban de cuivre faisant partie du circuit, et de façon que l'aiguille soit parallèle au conducteur.

Quand on a besoin d'un appareil accusant des courants moins énergiques, on forme alors un multiplicateur en enroulant un fil entouré de soie autour d'un cadre en bois, et de façon à faire trente ou quarante révolutions. On suspend au milieu du cadre, à l'aide d'un fil de soie une aiguille aimantée; à cet effet, une ouverture longitudinale ménagée à la partie supérieure permet l'introduction de l'aiguille. On adapte au-dessus de l'aiguille une autre aiguille en cuivre ou en bois, qui indique sur un cadran divisé la plus ou moins grande déviation de l'aiguille aimantée.

On a construit également des petites boussoles connues sous le nom de *galvanomètres de poche*, dans lesquelles l'aiguille placée au milieu du cadre est suspendue sur un pivot; leur sensibilité est plus grande quand on leur applique le principe des aiguilles astatiques, dont il sera question plus loin.

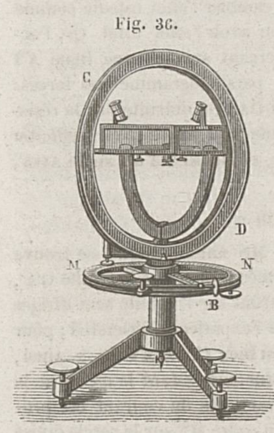
Balance de torsion. On peut, à l'aide du principe de la torsion, construire un instrument très-précis qui donne la mesure de l'intensité d'un courant électrique, et dont on a fait usage dans un grand nombre de recherches. Il consiste en un multiplicateur dans

lequel on substitue un fil de torsion, en argent ou en laiton non recuit, au fil de soie auquel est suspendue l'aiguille aimantée, et l'on mesure par la torsion sur un tambour disposé à cet effet, comme on l'a dit à propos de la balance de torsion (voir page 10), de combien de degrés il faut tordre le fil métallique pour ramener toujours l'aiguille au zéro de la division du cercle du multiplicateur, ou à sa position première. L'angle de torsion donnera donc immédiatement une quantité proportionnelle à l'intensité du courant électrique, laquelle pourra lui servir de mesure.

La plupart du temps on a recours à la boussole des sinus et à la boussole des tangentes, qui permettent d'évaluer rapidement l'intensité des courants électriques.

Boussole des sinus. La boussole des sinus, dont le principe a été indiqué en 1824 par M. de la Rive (*), a reçu de M. Pouillet la forme sous laquelle elle est adoptée aujourd'hui. Elle se compose d'un cadre ou d'un cercle CD formé d'une bande de cuivre rouge vers le milieu duquel, dans l'intérieur, se trouve une aiguille aimantée à chappe d'agate et qui se meut sur un pivot d'acier très-fin. Ce cercle est placé sur une alidade AB se mouvant sur un cercle divisé MN, de telle sorte que le pivot de l'aiguille se trouve toujours dans l'axe de rotation. Un système de niveaux et des vis calantes permettent de placer le cercle MN parfaitement horizontal; l'alidade portant un vernier, on peut facilement estimer sa position à une minute près. Les deux extrémités de la bande de cuivre CD, isolées à la base par un morceau d'ivoire, sont disposées de manière à être mises en communication avec la source d'électricité.

Fig. 36.



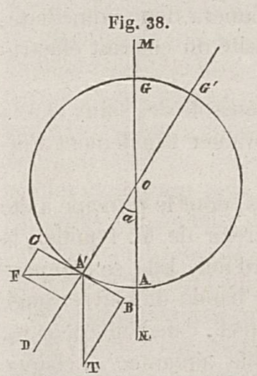
Le cercle CD doit être placé dans le méridien magnétique. Quand l'aiguille aimantée est déviée d'un certain nombre de degrés, on fait mouvoir le cercle CD au moyen de l'alidade AB qui y est fixée, de manière à le ramener dans le plan de l'aiguille; on y parvient à l'aide de lunettes qui permettent de viser sur les extrémités d'une

(*) *Mémoires de la Société de physique de Genève*, t. III, p. 117.

aiguille en cuivre fixée à angle droit sur l'aiguille aimantée. Dans ce cas l'intensité du courant électrique est proportionnelle au sinus de l'angle mesuré sur le cercle MN par le mouvement de l'alidade (*). Au lieu d'un circuit simple, c'est-à-dire d'une seule bande

(*) Soit NOD le plan horizontal du cercle divisé sur lequel on mesure la déviation d'une aiguille aimantée AG. Supposons le plan du cercle, contenant le fil parcouru par le courant, perpendiculaire au plan horizontal et passant d'abord par MN, qui est la direction du méridien magnétique. L'aiguille AG, qui était d'abord dans le plan MN, est chassée par l'action du courant en G'A', jusqu'à ce que la force répulsive due à l'action du courant soit égale à l'action magnétique de la terre qui tend à ramener l'aiguille dans le méridien magnétique MN.

Fig. 38.



Examinons ce qui se passe à l'un des pôles de l'aiguille ; l'action à l'autre pôle est égale et contraire, et il suffit de doubler l'effet calculé comme on va l'indiquer pour avoir l'effet total. Or, l'action de la terre s'exerçant suivant une ligne A'T parallèle à MN, se décompose en deux d'après le parallélogramme des forces : la première composante A'D située dans la direction OA', est détruite par la résistance du pivot ; la deuxième composante A'B a seule une action pour solliciter l'aiguille à revenir dans le méridien magnétique. Or, en nommant α l'angle AOA', on a pour la composante A'B

$$A'B = A'T \cos. BA'T = A'T \sin. \alpha.$$

Si donc on fait tourner le plan du cercle de cuivre MN autour duquel se trouve enroulé le fil conducteur de façon à l'amener dans le même plan que l'aiguille G'A', l'action exercée de la part du fil parcouru par le courant sur l'aiguille sera dirigée suivant A'C perpendiculairement au plan G'A', d'après l'expérience d'Oersted ; pour que l'équilibre ait lieu, il faut que l'on ait $A'C = A'B$, ou bien $A'C = A'T \sin. \alpha$. Ainsi, dans une série d'expériences, la longueur du fil conducteur restant la même et la puissance magnétique de l'aiguille ne variant pas, l'intensité du courant est proportionnelle au sinus de l'angle parcouru par le plan du cadre MN sur le cercle divisé horizontal. Tel est le principe de la *boussole des sinus*.

Quant à la boussole des tangentes, décrite plus loin, voici le principe sur lequel elle repose. Si le plan du cadre contenant le fil conducteur reste en MN dans le méridien magnétique, la force émanée du fil parcouru par le courant sera dirigée suivant la ligne A'F perpendiculaire à MN. Cette force se décompose en deux : la composante dirigée dans le sens de A'D est détruite par la résistance du pivot ; celle qui est dirigée suivant la tangente A'C est égale à $A'F \cos. \alpha$. Pour qu'il y ait équilibre, il est nécessaire que $A'B = A'C$. On a alors

$$A'T \sin. \alpha = A'F \cos. \alpha, \text{ ou bien } A'F = A'T \text{ tang. } \alpha.$$

Dans ce cas, l'intensité du courant est proportionnelle à la tangente de la dévia-

de cuivre, on peut opérer avec un circuit multiple dans le cas où l'on veut donner plus de sensibilité à l'appareil; on entoure alors le cercle de cuivre CD, qui est à gorge, d'un fil de cuivre recouvert de soie faisant une ou plusieurs circonvolutions, suivant l'intensité du courant à mesurer; on applique donc ici à l'instrument le principe du multiplicateur. On a supposé que l'aiguille aimantée était supportée par un pivot, mais pour des recherches précises, il est préférable d'y substituer par un autre mode de suspension une aiguille fixée à un fil de soie et supportée dans l'appareil, comme l'indique la boussole des tangentes représentée figure 37. Les moindres variations dans l'intensité du courant peuvent ainsi être rendues manifestes, ce qui n'a pas lieu quand l'aiguille est placée sur un pivot; cet appareil d'un emploi facile est alors d'une grande exactitude.

tion de l'aiguille. Mais il est une condition essentielle à remplir : l'action terrestre s'exerce bien de la même manière, quelle que soit la position de l'aiguille ; ainsi A'T peut être considérée comme constante dans la formule précédente; Mais A'F n'est proportionnelle à l'intensité du courant qu'autant que la distance des pôles de l'aiguille au fil conducteur est constante dans toutes les positions. Il est donc nécessaire que l'aiguille GA soit aussi courte que possible, et que le cercle MN soit très-grand.

Ainsi, dans la boussole des tangentes, la condition indispensable pour que les intensités soient proportionnelles aux tangentes de déviation serait que la longueur de l'aiguille fût infiniment petite. On ne peut pas atteindre cette limite.

D'après M. Despretz, qui a comparé avec soin les intensités des courants et les tangentes des déviations, dans une boussole des tangentes, dont le cercle des courants est d'un mètre, et l'aiguille est de trente mill. de longueur, les tangentes des déviations sont sensiblement proportionnelles aux intensités des courants électriques. Quand on emploie des boussoles dont les aiguilles sont plus longues, les intensités ne sont plus exactement proportionnellement aux tangentes des déviations, et alors on peut employer la formule

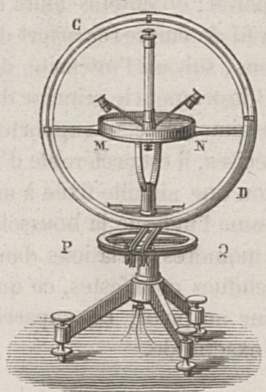
$$i = (1 + 3\theta^2) \text{ tang. } \alpha - \frac{15\theta^2}{8} \text{ sin. } 2\alpha,$$

i étant l'intensité du courant, α la déviation, θ le rapport entre la demi-distance des pôles de l'aiguille et le rayon du cercle du courant.

M. Gaugain a reconnu qu'en plaçant le centre de l'aiguille aimantée excentriquement par rapport au cercle vertical, on pouvait avoir des déviations dont les tangentes étaient proportionnelles à l'intensité du courant. M. Bravais, qui s'est occupé de cette question, a rendu compte du phénomène, par le calcul de l'action magnétique exercée par un courant circulaire sur l'aiguille aimantée, et en a déduit toute les circonstances des expériences.

Boussole de tangentes. La boussole des tangentes (fig. 37) se compose d'un grand cercle CD en cuivre rouge, dont le diamètre varie entre trois décimètres et un mètre; on fait passer le courant par le cercle lui-même ou par un fil enroulé autour de lui, comme avec l'appareil précédent. Ce cercle doit être parfaitement vertical, et on l'amène dans le méridien magnétique. L'aiguille doit être très-petite, et avoir le même centre que celui du cercle du courant; elle peut reposer sur un pivot en acier, mais il est préférable, comme le représente la figure, de la suspendre à l'aide d'un fil de cocon; une tige de cuivre mince qui lui est perpendiculaire, et qui est placée dans le même plan horizontal, sert à indiquer les déviations sur le cercle divisé MN. Un cercle en cuivre horizontal PQ permet d'utiliser aussi l'appareil comme boussole des sinus.

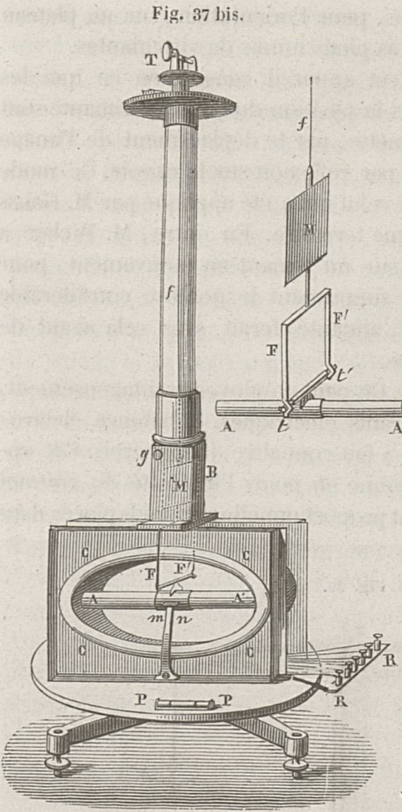
Fig. 37.



Dans cet instrument, les tangentes des déviations indiquées par l'aiguille ne sont proportionnelles aux intensités des courants électriques que dans cas où l'aiguille est infiniment petite par rapport au diamètre du cercle CD (voir la note précédente, relative aux boussoles des sinus et des tangentes). Comme on ne peut atteindre cette limite, il faut prendre le cercle un peu grand et l'aiguille fort petite; dans le cas contraire, on peut avoir recours à une formule plus compliquée, ainsi que l'a fait voir M. Despretz. On a bien proposé de remédier à ce défaut de proportionnalité des intensités aux tangentes des déviations, à l'aide de dispositions particulières (Poggendorf, Weber, Lenz, Péclet, Gaugain, Bravais), mais on peut se servir de l'appareil indiqué plus haut, en se conformant aux indications précédentes.

Magnétomètre. L'appareil construit par M. Weber et avec lequel on ne mesure que de très-petites déviations, donne également avec précision l'intensité des courants électriques. Il est formé comme il suit : à un fil *f* de soie sans torsion, long de soixante centimètres environ, se trouve suspendu un système composé d'un petit miroir de glace étamée à faces parallèles M, lié invariablement aux fourchettes FF'; celles-ci sont terminées par deux crochets qui reçoivent les tourillons d'une barre *tt'*, fixée perpendiculairement et

Fig. 37 bis.



par le milieu, à un fort barreau aimanté AA' de dix centimètres de longueur et de quinze millimètres environ de diamètre. Par cette disposition, l'axe du barreau se trouve perpendiculaire au plan du miroir qu'il entraîne dans tous ses mouvements. On place à une certaine distance une mire sur laquelle se trouve tracée une division en millimètres; une lunette munie de fils croisés permet d'observer par réflexion dans le miroir les divisions de la mire qui, à chaque mouvement du miroir, viennent se placer successivement dans l'axe optique de la lunette. On connaît d'ailleurs la distance de la mire au miroir, distance variable au gré de l'observateur et qu'il peut rendre plus ou moins grande suivant qu'il veut obtenir une approximation plus ou moins considérable.

Le fil de suspension *f* est attaché au treuil T d'un micromètre pareil à celui de la balance de Coulomb; le miroir M se trouve dans une petite boîte B qui s'ouvre en *g* pour permettre l'observation. Quant au barreau AA', il effectue ses oscillations dans l'intérieur d'une portion de cylindre elliptique CCCC en cuivre rouge d'une épaisseur de quinze millimètres environ, dont l'action inductive les amortit rapidement. Ce cylindre elliptique est environné d'un ou plusieurs fils de cuivre entourés de soie et isolés formant le cadre de ce multiplicateur, et qui viennent aboutir à des boutons en cuivre fixés sur une plaque d'ivoire RR attachée à l'appareil.

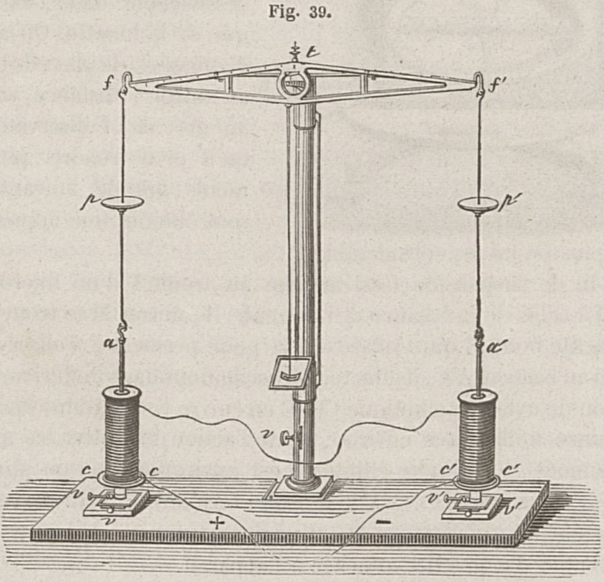
En *mn* se trouve une petite portion de cadran divisée (dix à quinze degrés) pour les observations très-approximatives, et pour placer le barreau à zéro.

Tout le système est mobile, pour l'orientation, sur un plateau horizontal PP supporté par trois pieds munis de vis calantes.

On voit que le principe de cet appareil consiste en ce que les plus faibles déplacements dans la position du barreau aimanté sont rendus sensibles, dans une lunette, par le déplacement de l'image des divisions de la mire vues par réflexion sur le miroir. Ce mode d'observation est le même que celui qui a été appliqué par M. Gauss aux observations de magnétisme terrestre. En outre, M. Weber a utilisé l'influence du cuivre sur un aimant en mouvement, pour abréger les observations en supprimant le nombre considérable d'oscillations que le barreau aimanté ferait sans cela avant de prendre sa position d'équilibre.

Balance électro-magnétique. On peut employer avantageusement, dans la comparaison des courants électriques, la balance électro-magnétique que l'un de nous a fait connaître (Becquerel). Cet appareil, représenté fig. 39, donne en poids l'intensité du courant électrique, cette intensité étant proportionnelle aux poids placés dans un des plateaux des balances.

Fig. 39.



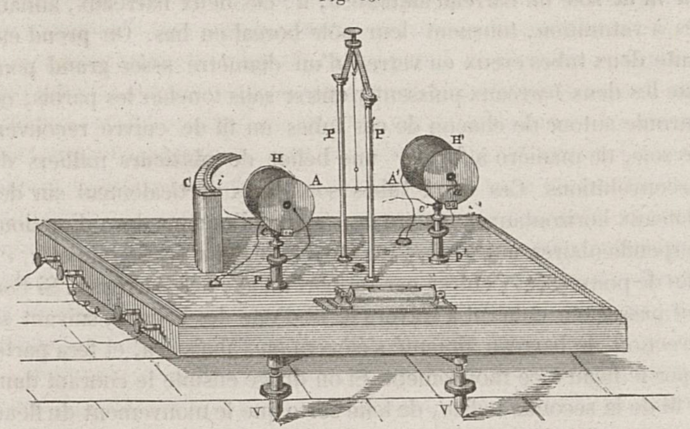
La balance d'essai doit trébucher à moins d'un milligramme; à chacune des extrémités du fléau ff' on suspend à une petite tige verticale un plateau p, p'; au-dessous de chaque plateau est fixé à

un fil de soie un barreau aimanté *a*, *a'*; ces deux barreaux, aimantés à saturation, tournent leur pôle boréal en bas. On prend ensuite deux tubes creux en verre, d'un diamètre assez grand pour que les deux barreaux puissent y entrer sans toucher les parois; on enroule autour de chacun de ces tubes un fil de cuivre recouvert de soie, de manière à former une hélice de plusieurs milliers de circonvolutions. Ces deux tubes sont fixés verticalement sur des plateaux horizontaux en cuivre *cc*, *c'c'*, mobiles dans deux directions perpendiculaires entre elles, au moyen de deux vis de rappel *v*, *v'*, afin de pouvoir les centrer par rapport à l'axe des barreaux. Si l'on fait passer un courant à travers le fil d'une des hélices, suivant sa direction, le barreau aimanté s'élèvera ou s'abaissera, et fera participer le fléau à ce mouvement. Si on dirige ensuite le courant dans le fil de la seconde hélice, de telle sorte que le mouvement du fléau s'exécute dans le même sens, et qu'on fasse communiquer ensemble les deux hélices, les deux actions s'ajouteront; l'appareil acquiert alors une grande sensibilité et indique le passage d'un faible courant dans tout le circuit. Nous allons donner une application de ce mode d'expérimentation. On a pris une lame de zinc et une lame de cuivre présentant chacune une surface de quatre centimètres carrés. Après les avoir mises en communication avec les deux extrémités libres des deux hélices, on les a plongées dans dix grammes d'eau, auxquels on avait ajouté une seule goutte d'acide sulfurique. Les plateaux ont trébuché, et il a fallu $0^{gr},0355$ pour maintenir l'équilibre. En opérant avec de l'eau distillée, on n'a employé que $0^{gr},0025$; d'où il résulte que l'intensité du premier courant est à celle du second dans le rapport de 355 à 25, ou comme 14 : 1. Cet appareil peut également servir à mesurer les courants électriques de faible intensité.

Multiplicateur à hélices. En donnant une autre position aux hélices et aux barreaux, on transforme la balance en un multiplicateur d'une très-grande sensibilité (Becquerel). Au lieu de placer les hélices dans une position verticale, on les met horizontalement, et l'on substitue deux aiguilles aimantées aux deux barreaux, lesquelles sont fixées chacune perpendiculairement à l'une des extrémités d'une tige très-mince de métal, que l'on suspend horizontalement par son milieu à un fil simple de cocon, pour donner une grande sensibilité à l'appareil. Voici l'indication des différentes parties dont il se compose :

AA', tige horizontale ayant une longueur de $0^{m},284$;

Fig. 40.



a, *a'*, aiguilles aimantées ayant chacune une longueur de 60 millimètres;

H, H', hélices en ivoire entourées chacune d'un fil de cuivre de 2,000 mètres de longueur;

p, *p'*, pieds mobiles des hélices;

c, *c'*, charnières des hélices;

C, cercle divisé portant une échelle arbitraire;

i, index, parcourant l'arc de cercle divisé;

PP, potence servant à suspendre l'aiguille AA' par un fil de cocon;

Une cage de verre peut être mise sur le socle adapté à une tige autour de laquelle il peut tourner, ce qui permet de placer les hélices dans la position la plus convenable relativement aux deux aiguilles aimantées;

V, V, V, vis calantes.

Les pôles des deux aiguilles étant placés inversement, on peut disposer le système de manière à ne lui laisser qu'une force directrice excessivement faible, condition indispensable pour donner à l'appareil une très-grande sensibilité. Dans leur position naturelle d'équilibre, les deux aiguilles, auxquelles on donne la courbure d'un arc de la circonférence décrite par l'extrémité de la tige, pénètrent, chacune jusqu'à leur point de jonction avec la tige horizontale, dans l'intérieur d'une des hélices qui sont placées de chaque côté du bras du levier. Le courant est dirigé de telle manière, que l'action qu'il exerce sur chaque aiguille chasse celle-ci hors de son

hélice; l'action se trouve ainsi doublée, puisque chaque hélice chasse l'aiguille dans une direction opposée.

Les deux hélices sont fixées, chacune, à une tige verticale mobile entrant avec frottement dans un cylindre de laiton creux, lequel peut être élevé ou abaissé à volonté. Elles peuvent en outre, au moyen de charnières, être inclinées dans un sens ou dans un autre. On a ainsi tous les moyens nécessaires pour centrer les aiguilles aimantées, c'est-à-dire pour les placer dans la direction des axes des hélices.

Dans le principe cet appareil contenait quatre hélices au lieu de deux, afin d'agir sur les quatre pôles à la fois; mais dans cette disposition la course du levier horizontal était très-limitée, puisque l'aiguille aimantée qui était attirée par l'hélice ne pouvait y entrer que d'une demi-longueur, c'est-à-dire de trente millimètres.

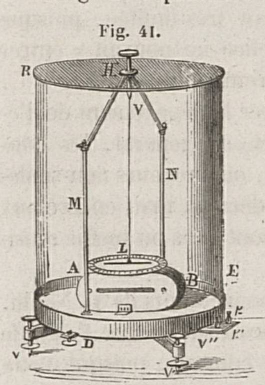
Galvanomètres. Quand il s'agit d'observer le dégagement de l'électricité dans les phénomènes chimiques et, en général, les courants électriques d'une très-faible intensité, on a recours non-seulement aux instruments qui viennent d'être décrits, mais encore aux appareils appelés galvanomètres, et qui sont plus ou moins sensibles, selon leur construction.

Ces appareils ont reçu de grands perfectionnements de M. Nobili. L'influence du magnétisme terrestre s'opposant à ce que l'aiguille aimantée obéisse entièrement à l'action du courant, puisque cette influence la ramène continuellement dans le plan du méridien magnétique, on la détruit en substituant à l'aiguille aimantée deux autres aiguilles placées dans une position parallèle à l'extrémité d'une tige très-légère, les pôles inverses en regard comme le représente la figure 35; c'est le système astatique de M. Ampère. Si les deux aiguilles étaient parfaitement identiques, possédaient la même quantité de magnétisme, et se trouvaient dans deux directions parfaitement parallèles, le globe n'exercerait aucune action sur le système: mais il ne peut jamais en être ainsi; il lui reste toujours une force directrice très-faible, qui le ramène dans une position fixe, quand on l'en écarte. L'une des deux aiguilles est placée dans l'intérieur de la boîte du galvanomètre, et l'autre en dehors; l'action des quatre parties du cadre du multiplicateur sur l'aiguille intérieure a lieu dans le même sens. Quant à l'aiguille extérieure, il n'y a que la partie supérieure du cadre qui agisse sur elle dans le même sens que sur l'aiguille intérieure; les autres agiraient en sens inverse, mais, comme elles sont plus éloignées, leur action est beaucoup

plus faible. L'effet du courant sur la double aiguille est nécessairement plus forte que sur une seule, abstraction faite de l'action terrestre; mais, comme en outre il ne reste plus aux aiguilles qu'une force directrice peu sensible, il en résulte que de très-faibles courants, qui ne peuvent mettre en mouvement une des deux aiguilles, impriment au système une action très-prononcée. Le multiplicateur, avec cette addition, est l'instrument le plus délicat que l'on possède pour constater, dans un grand nombre de phénomènes, l'existence de courants électriques qu'on ne soupçonnait pas jadis.

La fig. 41 représente un de ces appareils construit par M. Rumkorff. AB est le châssis enveloppé par le fil de cuivre dont les bouts aboutissent aux boutons métalliques FF′. Ce châssis est fixé sur un plateau horizontal DE, qui peut tourner dans son plan et autour de son centre au moyen d'une roue dentée à pignon placée en-dessous, et mise en mouvement par un bouton. HMN est le support du système astatique des deux aiguilles aimantées suspendues à un fil de cocon VL; R est le cylindre de verre qui enveloppe l'appareil et repose sur le plateau de cuivre. Le cadran divisé placé sur le châssis est percé à la partie centrale d'une petite ouverture circulaire et d'une fente transversale, afin de pouvoir placer et retirer l'aiguille à volonté. Les trois vis v, v', v'', servent à mettre l'appareil de niveau et à centrer l'aiguille.

Fig. 41.



Le fil métallique qui entoure le cadre ABC est un fil de cuivre recouvert de soie; on lui donne une longueur plus ou moins grande et un diamètre plus ou moins petit, suivant les expériences que l'on a en vue. Pour des courants thermo-électriques, un fil d'un cinquième de millimètre de diamètre suffit; on l'entoure deux ou trois cents fois seulement autour du châssis. Pour les actions chimiques, on prend un fil plus fin, et on l'enroule deux ou trois mille fois; pour des expériences très-délicates on construit des galvanomètres qui ont jusqu'à trente mille tours.

Afin de bien fixer la position de l'aiguille, on place une petite lunette ou une loupe sur l'enveloppe du verre au haut de l'appareil.

Quand on veut se servir de ces appareils pour étudier les effets des décharges électriques, on isole les fils, non-seulement avec de la soie, mais encore en les enduisant de vernis à la gomme laque; puis, quand on les enroule, on les vernit de nouveau à chaque tour.

Dans beaucoup de circonstances il est nécessaire de former une table des intensités qui donne le rapport entre la déviation de l'aiguille aimantée et l'intensité du courant qui l'a produite. On peut s'y prendre de plusieurs manières. Le procédé le plus facile et le plus exact consiste à construire le galvanomètre de façon que deux fils conducteurs de même longueur soient enroulés parallèlement l'un à l'autre. On a alors un galvanomètre à deux fils, qui est dû à l'un de nous (Becquerel).

On conçoit que si l'on enroule, en même temps, autour d'un châssis, deux fils égaux, l'aiguille aimantée ne sera pas dérangée de sa position d'équilibre quand on fera passer dans chaque fil un courant d'égale intensité émanant d'une source semblable, mais dirigés en sens contraire l'un de l'autre. En faisant passer dans chaque fil un courant d'égale intensité, mais dirigé dans le même sens, la déviation de l'aiguille aimantée correspondra à une force double de celle qu'on aurait avec un seul courant. En faisant varier l'intensité du courant qui passe dans chaque fil, on aura une série d'observations qui permettront de former une table des intensités électriques; on peut également construire des galvanomètres à trois, quatre fils et même davantage. (Becquerel, *Traité d'électricité*, tome II, p. 15 et suivantes.) Nous renvoyons au surplus au même ouvrage, même volume, pour l'exposé des diverses méthodes en usage pour la formation de la table des intensités.

En général, quand on ne dépasse pas 20°, on peut considérer les déviations comme sensiblement proportionnelles aux intensités du courant électrique qui passe.

Quand on veut transporter le galvanomètre, on commence par abaisser les aiguilles, jusqu'à ce que l'aiguille supérieure vienne se poser sur le cadran; puis on retire la cloche, et après avoir mis sur une des moitiés de l'index un large ruban de soie, de manière que les deux bouts en ressortent par les bords du cercle métallique DE, on remet en place la cloche; alors le fil de cocon ne soutenant plus aucun poids, et les aiguilles étant presque immobiles par la pression du ruban, on peut faire parcourir à l'instrument de grandes distances sans craindre de le déranger.

Nobili a remarqué le premier que les aiguilles aimantées des multiplicateurs les plus sensibles ont deux positions d'équilibre stable, situées à la même distance de chaque côté du diamètre qui passe par le zéro du cadran, en sorte que l'index amené sur cette ligne s'y trouve nécessairement dans un état d'équilibre instable, et tombe toujours dans l'une ou l'autre des deux positions primitives.

Ces deux positions d'équilibre dérivent de l'action magnétique du fil de cuivre, dont les circonvolutions supérieures sont partagées en deux masses, afin de pouvoir introduire dans l'intérieur du châssis une des aiguilles aimantées. Or, il est facile de voir que ces deux centres d'attraction constituent un inconvénient très-grave: l'action magnétique du cuivre diminue non-seulement la sensibilité du multiplicateur, mais elle altère encore la proportionnalité qui aurait lieu naturellement entre les degrés et les forces de déviation dans les arcs rapprochés de zéro. Ce magnétisme du cuivre, qui réagit dans cette circonstance sur les aiguilles, est dû en grande partie au fer que renferme ce métal. Actuellement, on est parvenu à obtenir des multiplicateurs qui ne présentent pas cet inconvénient, c'est-à-dire dans lesquels l'aiguille garde toujours le zéro.

Les mêmes difficultés que l'on éprouve pour les fils de cuivre ont lieu également à l'égard du châssis, du plateau tournant et de la plaque métallique qui porte le cercle divisé; on se trouve par là dans la nécessité de n'employer que du laiton très-pur.

CHAPITRE III.

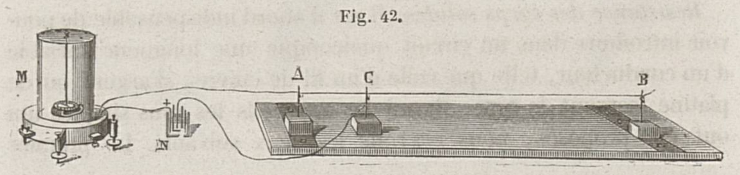
Conductibilité des corps pour l'électricité.

Résistance. Les corps se comportent bien différemment, relativement à la manière dont ils conduisent l'électricité. Il nous est possible, maintenant que nous avons donné des notions sur les piles voltaïques et sur leurs propriétés générales, d'indiquer les pro-

cédés à l'aide desquels on détermine la conductibilité relative des différents corps.

Établissons d'abord ce que l'on entend par *résistance* d'un corps au passage de l'électricité. Plaçons sur une table un long fil de cuivre AB tendu entre deux pinces (fig. 42), en M un multiplica-

Fig. 42.



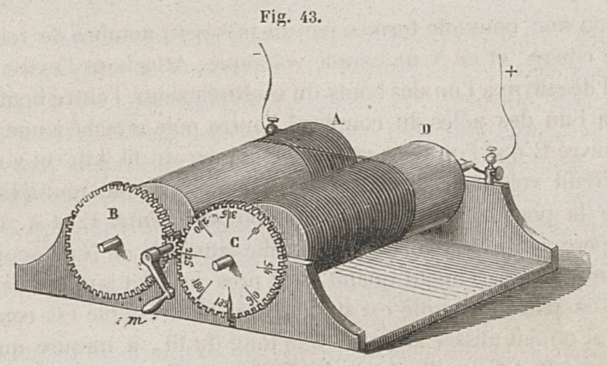
teur ou une boussole formée par un très-petit nombre de tours de fil de cuivre, et en N un couple voltaïque. Attachons l'extrémité A du fil de cuivre à l'un des bouts du multiplicateur, l'autre bout étant fixé à l'un des pôles du couple et l'autre pôle attaché à une pince en cuivre C que l'on peut promener le long du fil AB. On voit que le circuit voltaïque sera composé du couple, du multiplicateur et de la portion du fil de cuivre comprise entre C et A. Quand on opère ainsi, on voit que l'aiguille aimantée de N présente son maximum d'écartement quand C est près de A, et tant que la pince reste en place l'aiguille est stationnaire si le couple est constant; mais si on fait glisser la pince C le long du fil, à mesure que l'on s'éloigne de A l'aiguille du multiplicateur indique une déviation de moins en moins grande. La déviation augmente au contraire quand on fait revenir la pince sur ses pas. Cette expérience très-simple montre donc qu'il passe d'autant moins d'électricité que la longueur du circuit à parcourir est plus longue, la source électrique étant la même. Les effets sont plus manifestes en se servant de fils de fer ou de platine très-fins. Il résulte de là que les corps, même les meilleurs conducteurs, offrent une certaine *résistance* au passage de l'électricité, mais les effets produits avec les différentes substances sont loin d'être les mêmes. Cela revient à dire qu'il n'y a pas de corps parfaitement conducteurs et qu'ils sont tous un peu isolants, de même que l'on ne connaît pas de corps isolants d'une manière absolue, attendu que l'électricité pénètre peu à peu à une petite profondeur dans le verre, la gomme laque, le soufre, etc. comme on l'a vu à propos des résidus électriques dans les condensateurs.

Plus les corps sont bons conducteurs, moins ils offrent de résistance. Si donc on peut mesurer les résistances relatives, on en

déduira facilement les *pouvoirs conducteurs* en prenant les nombres inverses (*). Dans les déterminations numériques, on fait usage des *résistances relatives* que les corps présentent au passage de l'électricité. Ce sont elles dont nous allons indiquer la détermination dans les solides, les liquides et les gaz.

Résistance des corps solides. Il est d'abord indispensable de pouvoir introduire dans un circuit quelconque une longueur variable d'un conducteur, telle que celle d'un fil de cuivre, d'argent ou de platine, servant de type. Parmi les appareils les plus simples qui ont été proposés, nous citerons les deux suivants. Le premier

Fig. 43.

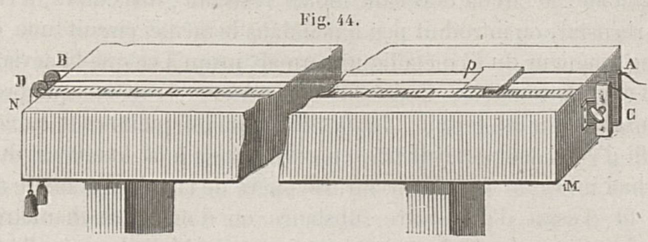


est le rhéostat, imaginé par M. Wheastone, et qui se compose de deux cylindres AB, CD, l'un en bois, le second en métal. Ils portent chacun un pas de vis, de sorte qu'un fil métallique peut s'enrouler sur le cylindre CD dans toute sa longueur. Une manivelle *m* permet de faire mouvoir à la fois les deux cylindres, c'est-à-dire d'enrouler le fil métallique sur le cylindre en bois, tout en le déroulant de dessus le cylindre de métal. Comme on peut compter le nombre des révolutions des deux cylindres, et même les fractions de tours, on connaît à chaque instant la longueur du fil métallique enroulé sur le cylindre en bois. Il résulte de la disposition même de l'appareil que le cylindre CD, sur lequel le fil est enroulé primitivement, étant conducteur, si l'instrument fait partie d'un circuit voltaïque, en déroulant le fil on peut en introduire telle longueur que l'on voudra dans ce circuit.

(*) Soit R la résistance, C le pouvoir conducteur, on admet $C.R = a$, a étant une quantité constante.

Le second appareil a été employé par l'un de nous dans les re-

Fig. 44.



cherches dont il sera question plus loin (E. Becquerel). Il se compose d'une longue pièce de bois MN sur laquelle deux fils métalliques AB, CD, parallèles, sont tendus dans toute la longueur. Ils sont isolés l'un de l'autre, maintenus par leurs extrémités A et C dans des pinces de cuivre isolées, et tendus par leur extrémité B et D à l'aide de poids; les deux poulies situées à l'extrémité N facilitent la tension convenable des fils. Un curseur P en cuivre, placé sur les fils, se meut sur toute leur longueur, et les touche toujours, quelle que soit la position qu'il occupe le long de la pièce de bois; une règle divisée indique à chaque instant cette position. Il est facile de comprendre qu'en éloignant le curseur de deux ou trois décimètres, on introduit dans le circuit deux fois plus de fil métallique, puisque deux ou trois décimètres de chaque fil se trouvent compris dans le circuit, le curseur P étant conducteur.

Les appareils précédents permettent donc d'augmenter un circuit quelconque d'une longueur déterminée d'un fil métallique normal servant à comparer les résistances des différents corps. On peut employer les procédés suivants pour effectuer cette comparaison.

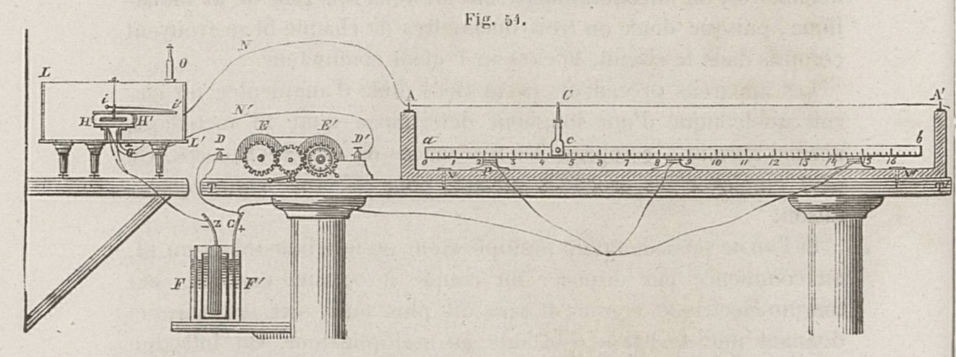
Si l'on ne possède qu'un multiplicateur ou une boussole à un fil, on commence par disposer un couple à courant constant (soit thermo-électrique, comme il sera dit plus tard, soit ordinaire) et donnant une déviation constante au multiplicateur. On introduit dans ce circuit le fil métallique sur lequel on agit et qui est tendu entre deux pinces; on s'arrange pour que l'on puisse diminuer ou augmenter la longueur de ce fil à l'aide d'une disposition analogue à celle qui est indiquée dans la fig. 42. On introduit également dans le circuit l'un des deux instruments indiqués plus haut. Cela fait, on note la déviation constante du multiplicateur, observée avec une loupe ou avec une lunette, afin de la déterminer avec exactitude; puis on diminue la longueur du fil d'essai d'un, deux, trois,

quatre décimètres ou plus. La déviation de l'aiguille aimantée augmente, le circuit devenant moins résistant ; mais alors, à l'aide du rhéostat, on introduit peu à peu dans le même circuit une certaine longueur du fil métallique normal, jusqu'à ce que la déviation de l'aiguille aimantée diminuant soit revenue la même que précédemment. On est certain, dans ce cas, que les quelques décimètres de fil d'essai sont équivalents, en résistance, à la longueur du fil normal introduit dans le circuit. On opère de la même manière avec un fil d'essai d'une autre substance ou d'un autre diamètre et on obtient son équivalent en résistance à l'aide d'une nouvelle longueur du fil normal. Alors il est évident que les rapports des résistances des deux fils d'essai seront donnés par les rapports des nombres qui expriment les longueurs du fil normal introduit chaque fois dans le circuit ; en outre, le rapport inverse de ces mêmes nombres donne le rapport des pouvoirs conducteurs des deux fils.

On peut obtenir les résistances comparatives des fils métalliques à l'aide d'une méthode qui est préférable à la précédente, en ce qu'elle est indépendante des petites variations qui peuvent avoir lieu dans l'intensité du courant avec lequel on opère (E. Becquerel).

On fait usage d'un multiplicateur à deux fils LL' formé d'un petit nombre de tours ; les deux fils sont enroulés autour l'un de

Fig. 54.



l'autre et tordus de manière à ne faire qu'un seul ruban, dont on enveloppe le cadre HH', afin que les positions relatives des parties de chaque fil et des différents points de l'aiguille aimantée soient identiquement les mêmes. On divise le courant électrique émanant d'un couple FF' en deux branches de façon que les deux courants partiels passent simultanément dans les deux fils, mais en sens inverse. On comprend que s'il y a identité de conductibilité des deux circuits, l'aiguille aimantée se maintiendra à 0. On fixe la posi-

tion du zéro à l'aide d'une lunette O visant sur l'index *ii'* et d'une vis G qui fait tourner le cadre du multiplicateur. Cela fait, on introduit dans le premier circuit le fil d'essai AA', dont on peut varier la longueur à volonté; à cet effet une pince mobile en cuivre C*c* se meut le long d'une règle de même métal *ab* et divisée, en sorte que si le fil AA est tendu entre les pinces A et A', et que la pince A communique seule avec l'un des bouts du premier circuit et la règle de cuivre avec l'autre bout, la portion AC du fil métallique AA' sera seule introduite dans le circuit. Ainsi en faisant mouvoir cette pince on allongera ou on raccourcira le fil d'essai. Dans le deuxième circuit on place en DD' un rhéostat; on peut employer, comme l'indique la figure, celui qui a été décrit page 80. D'après cette disposition, rien n'est plus facile, avant chaque expérience, que de faire varier la longueur du fil normal EE' du rhéostat pour amener les deux circuits à avoir la même résistance, et afin de maintenir l'aiguille au 0°, quelle que soit l'intensité du courant électrique. Une fois ce point atteint, on fait varier la longueur de AC d'une certaine quantité : l'aiguille aimantée est chassée dans un sens ou dans l'autre; on fait ensuite varier la longueur du fil du rhéostat jusqu'à ce que le zéro soit atteint de nouveau. Alors on est certain que les longueurs du fil d'essai et du fil normal sont équivalentes comme dans les expériences précédentes.

Cette méthode permet de maintenir le fil d'essai enroulé en hélice autour d'un tube, à une température constante plus ou moins élevée, en le plongeant dans un bain d'huile chauffé, afin d'examiner l'influence de la chaleur sur la conductibilité des métaux.

L'examen des résultats obtenus à l'aide des conducteurs métalliques a conduit aux conséquences suivantes :

1° Dans un circuit métallique composé de fils différents placés bout à bout, l'intensité électrique est la même partout au même instant, en sorte qu'une aiguille aimantée promenée le long de ce circuit éprouve la même action.

2° La résistance d'un fil métallique est proportionnelle à sa longueur (Davy, Becquerel, etc.).

3° La résistance d'un fil métallique est en raison inverse de sa section, ou bien du carré du diamètre s'il est cylindrique (Davy, Becquerel, etc.).

Cette proposition est fort importante en ce qu'elle montre que l'électricité à l'état de courant ne s'accumule pas à la surface des conducteurs comme lorsqu'elle est à l'état statique, mais qu'elle

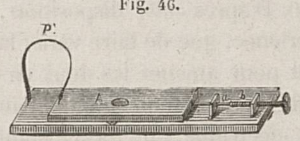
se propage de molécule à molécule dans la masse entière du corps.

Il résulte de là que, dans les conducteurs plats, les courants électriques ne circulent pas plus facilement que dans les fils cylindriques à égalité de section; mais seulement, dans quelques cas, on en fait usage à cause de la facilité avec laquelle on les manie.

Dans les expériences précises, il faut déterminer directement les diamètres des fils que l'on veut comparer, car ils ne sont jamais parfaitement cylindriques. On peut employer à cet effet un petit appareil imaginé par Lebaillif et dont voici la description :

On place sur le porte-objet d'un microscope un micromètre A tracé sur verre et divisé en centièmes de millimètres. Ce micromètre glisse sur un autre morceau de verre sur lequel un trait est tracé; il est sollicité par un ressort P destiné à faire appuyer l'une contre l'autre bout à bout deux petites tiges *a* et *b* en cuivre; la tige *b* est formée par une vis qui permet d'avancer à volonté le micromètre A et d'amener le trait à coïncider avec l'une des divisions du micromètre. Si donc on interpose entre les deux extrémités *a* et *b* de ces petites tiges un fil métallique, il se trouvera pincé suivant son diamètre, et la marche du trait vue au microscope en mesurera l'étendue. Cette opération répétée à angle droit en différents points du fil fait connaître avec exactitude son diamètre.

Fig. 46.



4° Quand la température ne varie pas, la résistance d'un métal paraît indépendante de l'intensité du courant.

5° La nature des métaux a une grande influence sur leur résistance à la conductibilité; à diamètre et à longueur égale, on a obtenu les résultats suivants à la température ordinaire de 12°,5 (E. Becquerel) :

SUBSTANCES.	RÉSISTANCES par rapport à l'argent, à + 12°,5.		POUVOIRS CONDUCTEURS par rapport à l'argent.		RAPPORT de la conductibilité du métal recuit et du métal écroui.
	Métal écroui.	Métal recuit.	Métal écroui.	Métal recuit.	
Argent.	107,00	100	93,45	100	1,070
Cuivre	112,25	109,36	89,08	91,44	1,026
Or.............	155,31	152,77	64,39	65,46	1,017
Cadmium........	406,94	»	24,57	»	»
Zinc...........	413,84	»	24,16	»	»
Étain..........	732,26	»	13,66	»	»
Palladium........	714,59	»	13,98	»	»
Fer............	824,82	817,44	12,12	12,25	1,010
Plomb.	1212,90	»	8,25	»	»
Platine..........	1243,47	1227,48	8,04	8,15	»
Mercure (à + 14° centigr.)	5550,15	»	1,80	»	» (*)

Les nombres relatifs au pouvoir conducteur ont été déduits des résistances d'après cette hypothèse qu'ils sont en raison inverse l'un de l'autre.

Dans les déterminations numériques des résistances, même lorsqu'on opère avec des fils tirés par un même trou de filière, ces fils n'ont pas le même diamètre, n'ayant pas la même élasticité; il est donc nécessaire de déterminer directement leur diamètre comme on vient de le voir, et de ramener les nombres observés à ce qu'ils

(*) Suivant M. Deville, l'aluminium, qui a une densité très-faible, 2,5, conduit 8 fois mieux l'électricité que le fer; d'après cela ce métal doit être placé à côté des métaux qui conduisent le mieux, l'or, le cuivre et l'argent.

Voici quelques-uns des résultats obtenus antérieurement aux expériences qui viennent d'être rapportées, et qui indiquent les pouvoirs conducteurs relatifs de différents métaux :

MÉTAUX.	DAVY.	BECQUEREL.	POUILLET.
Cuivre...........	100	100	100.
Or.............	73	93,6	84
Argent.	109	73,6	116
Zinc............	»	28,5	»
Platine..........	18	16,4	13
Fer............	14,5	15,8	16
Étain..........	»	15,5	»
Plomb..........	69	8,3	»
Laiton..........	»	»	12

seraient en prenant des fils de même section, et cela d'après la troisième loi.

Il est intéressant de remarquer combien les pouvoirs conducteurs relatifs à la chaleur se rapprochent des pouvoirs conducteurs pour l'électricité. En effet, d'après un travail de MM. Wiedemann et Franz, les conductibilités calorifiques des métaux pour de faibles différences de température sont représentées comme il suit :

Substances.	Pouvoirs conducteurs pour la chaleur dans l'air.
Argent	100
Cuivre	73,6
Or	53,2
Laiton	entre 23,1 et 24,1
Étain	14,5
Fer	11,9
Acier	11,6
Plomb	8,5
Platine	8,4
Bismuth	1,8

On voit que les pouvoirs conducteurs pour l'électricité et pour la chaleur sont représentés par des nombres placés dans le même ordre et qui, pour quelques-uns, sont à peu près les mêmes.

Le premier tableau met encore en évidence combien l'écrouissage a d'influence sur la conductibilité; mais on sait que la densité des métaux se trouve changée lors de cette action.

6° La chaleur modifie profondément la conductibilité électrique des métaux. A mesure que leur température s'élève, leur résistance augmente, et par conséquent ils deviennent de moins en moins bons conducteurs. En calculant d'après la dilatation connue des métaux, si l'effet produit tient à l'augmentation de la longueur et du diamètre par l'action de la chaleur, on trouve que cet effet ne peut expliquer les changements que l'on observe. On doit donc admettre que la chaleur agit par une action propre en changeant la conductibilité électrique moléculaire. Du reste, nous verrons plus loin, en parlant des liquides et des gaz, combien cette action est complexe.

Quand on opère entre des limites de température peu différentes, entre 0 et 100°, l'augmentation de résistance due à l'action de la chaleur peut être considérée comme proportionnelle à la différence de température et déterminée par les coefficients

suivants, rapportés à la résistance de chaque métal à 0° (E. Becquerel) :

Substances.	Coefficients d'augmentation de résistance pour une élévation de température de 1°.
Mercure	0,001040
Platine	0,001861
Or	0,003397
Zinc	0,003675
Argent	0,004022
Cadmium	0,004040
Cuivre	0,004097
Plomb	0,004349
Fer	0,004729
Étain (du commerce)	0,005042
Étain assez pur	0,006188

L'usage de ces nombres est facile à comprendre. Si la résistance d'un fil est représentée par R à 0°, à la température t elle sera R $(1 + at)$, a étant un des nombres précédents relatif au métal sur lequel on expérimente (*).

Nous venons d'indiquer quels sont les effets de conductibilité que l'on observe avec les fils métalliques ou les conducteurs cylindriques. Lorsque les corps ont la forme de plaques ou de masses plus ou moins irrégulières, les effets sont plus complexes, car la propagation a lieu en tous sens autour des points par où débouche l'électricité. Les résultats précédents ne s'appliquent qu'au cas où l'électricité suit une ligne déterminée dans un conducteur homogène.

Voilà bien ce qui se passe dans les métaux ; mais d'autres substances solides peuvent transmettre les courants électriques, surtout quand on élève leur température. Ainsi un grand nombre de corps qui ne sont pas conducteurs de l'électricité à la température ordinaire,

(*) Soit L la longueur d'un fil métallique, D son diamètre, A un coefficient dépendant de sa nature et représentant sa résistance à 0° ; ce dernier nombre peut être déduit du tableau dans lequel sont inscrits les pouvoirs conducteurs. Soient encore a le coefficient d'augmentation de résistance avec la température, et t cette température ; la résistance du fil métallique à T° étant R sera :

$$R = \frac{4AL}{\pi D^2}(1 + at) ;$$

et le pouvoir conducteur C pourra être représenté par la formule

$$C = \frac{\pi D^2}{4AL\,(1 + at)}.$$

tels que la glace, certains sels, comme le chlorure de plomb, les chlorures alcalins, le verre, etc., acquièrent cette faculté quand ils sont fondus, et même souvent avant leur point de fusion. Parmi les corps solides qui jouissent de cette propriété, on a cité l'iode qui devient conducteur quand il est fondu (Inglis et Palmieri). D'après M. Beetz, lors du passage d'un courant électrique entre deux lames de platine plongées dans l'iode fondu, il y a polarisation des lames, ce qui indiquerait la présence d'une matière décomposable par l'électricité et mélangée à l'iode en faible proportion.

Le sulfure d'argent, le bi-iodure de mercure et le fluorure de plomb jouissent d'un pouvoir analogue (Faraday). Le sulfure d'argent, qui conduit l'électricité quand il est même faiblement chauffé, se décompose électro-chimiquement lors de cette action (Hittorf).

Le bi-iodure de mercure commence vers 110° à livrer passage aux courants électriques, c'est-à-dire à une température bien inférieure à son point de fusion, et l'on trouve autour de l'électrode négative du mercure réduit.

Le fluorure de plomb devient conducteur au-dessous de la température rouge et éprouve de même une décomposition électro-chimique (Beetz).

Quant aux composés siliceux, aux verres, ils conduisent également l'électricité à une température peu élevée, et leur pouvoir conducteur s'accroît rapidement à mesure que l'on approche de la température rouge. De même que les corps précédents, ces substances éprouvent une décomposition électro-chimique. On verra, dans le livre suivant, l'application de ce principe à la construction des couples pyro-électriques.

Voici quelques déterminations indiquant les résistances d'un tube de verre chauffé à diverses températures (de Buff) :

Température du verre chauffé.	Résistances relatives.
200°....................	258,2
250....................	158,3
300....................	16,8
350....................	11,8
400....................	8,4

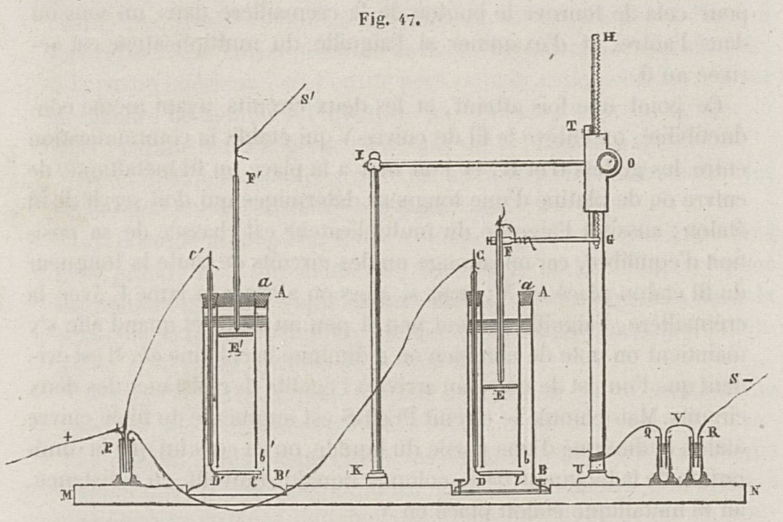
La chaleur, comme on le voit, agit différemment sur ces corps que sur les métaux puisqu'elle augmente leur pouvoir conducteur tandis qu'elle diminue celui des métaux; mais aussi la conductibilité électrique est liée à la décomposition électro-chimique de ces composés qui est favorisée par suite d'une élévation de température, et

elle se manifeste principalement lorsque les corps sont fondus, et même, dans quelques cas, bien avant la fusion. La chaleur agit sur eux dans le même sens que sur les liquides, comme on va le voir plus bas; d'après cela, ces exemples ne peuvent être invoqués en faveur du passage de l'électricité au travers des corps composés sans décomposition. Du reste, nous traiterons cette question dans le second volume, après avoir parlé des décompositions électro-chimiques.

Résistance des liquides. Un grand nombre de liquides, et principalement les dissolutions salines et les sels en fusion ignée, conduisent l'électricité; mais en général la résistance qu'ils opposent au passage de cet agent est plus grande que dans les métaux. Quant aux huiles essentielles, etc., elles sont isolantes dans les conditions ordinaires.

Il est facile de déterminer les résistances des liquides et par conséquent leur pouvoir conducteur à l'aide d'un procédé analogue à celui qui a été décrit précédemment. On s'arrange pour qu'ils soient enfermés dans des tubes et que l'on puisse faire varier à volonté les longueurs des colonnes liquides suivant des nombres déterminés. L'appareil représenté ci-après permet d'atteindre ce but (E. Becquerel).

Fig. 47.



Il est nécessaire d'abord de disposer un couple voltaïque, ou une pile, et un multiplicateur à deux fils, comme le représente la

figure 45; mais à la place des circuits métalliques AA', EE' de cette même figure, on emploie deux colonnes conductrices liquides *ab*, *a'b'*, représentées figure 47. Sur une table MN se trouvent deux éprouvettes AB, A' B', de quatre ou cinq centimètres de diamètre et de trois décimètres de hauteur. Dans ces éprouvettes plongent deux tubes cylindriques *ab*, *a'b'*, ayant même axe que les premières et retenus par en haut à l'aide de liéges, et s'arrêtant à quatre centimètres du fond. Dans ces tubes, exactement calibrés et placés verticalement, peuvent se mouvoir de haut en bas et de bas en haut des lames circulaires de platine horizontales E, E', ou d'un autre métal, d'un diamètre un peu plus petit que celui de ces tubes, et attachées à des fils de platine soudés dans des tubes de verre FE, F'E'. Des lames de différents métaux DL, D'L' sont placées horizontalement au fond des éprouvettes, et communiquent à des fils métalliques qui débouchent en dehors. On peut élever ou abaisser à l'aide d'une crémaillère GH le disque E et déterminer sur la tige de cuivre UH sa marche en millimètres et fractions de millimètre. On comprend d'après cette disposition qu'en plaçant le liquide dont on étudie la conductibilité dans les éprouvettes, et qu'en divisant le courant suivant les deux circuits, il sera facile d'arriver à obtenir l'égalité de résistance comme avec les fils métalliques de la figure 45; il suffira pour cela de tourner le bouton de la crémaillère dans un sens ou dans l'autre, et d'examiner si l'aiguille du multiplicateur est arrivée au 0.

Ce point une fois atteint, et les deux circuits ayant même conductibilité, on enlève le fil de cuivre V qui établit la communication entre les godets G et R, et l'on met à la place un fil métallique de cuivre ou de platine d'une longueur déterminée qui doit servir de fil étalon : aussitôt l'aiguille du multiplicateur est chassée de sa position d'équilibre, car on allonge un des circuits de toute la longueur du fil étalon placé en V; mais si alors on abaisse la lame E avec la crémaillère, l'aiguille revient peu à peu au zéro, et quand elle s'y maintient on note de combien on a diminué la colonne *ab*. Il est évident que l'on est de nouveau arrivé à l'égalité de résistance des deux circuits. Mais comme le circuit PCQRS est augmenté du fil de cuivre étalon et diminué d'une partie du liquide, on en conclut que la diminution de la longueur de la colonne liquide équivaut, en résistance, au fil métallique étalon placé en V.

Il est indispensable d'interposer dans le circuit PCEFQS une boussole des sinus qui donne dans le cours de ces expériences

l'intensité du courant actif, et cela indépendamment du multiplicateur à deux fils placé comme dans la figure 45.

On comprend que par ce procédé, en plaçant diverses longueurs de fil étalon en V, et en employant successivement dans les deux éprouvettes des liquides différents, on parvient à trouver quelles sont les longueurs des colonnes liquides équivalentes à un même fil étalon; ces longueurs sont en raison inverse de leur résistance à la conductibilité. On peut aussi bien mettre en V un des rhéostats décrits plus haut, par exemple le banc de résistance (fig. 44), et faire varier également le fil étalon que l'on interpose dans le circuit.

Il est d'autant plus nécessaire pour les liquides d'opérer en diminuant ou en allongeant les colonnes liquides sur lesquelles on opère, au lieu de prendre la résistance de la colonne liquide entière, y compris les électrodes métalliques, que l'électricité, lors du passage d'un métal dans un liquide, éprouve une résistance particulière, nommée *résistance au passage*, et indépendante de la résistance propre du liquide. Il en sera question plus loin.

Lorsqu'on emploie pour liquides des dissolutions métalliques décomposées par le courant électrique, il faut, autant que possible, faire passer le courant de manière que les lames inférieures soient positives, et qu'elles soient de même nature que le métal dissous. Ainsi avec des dissolutions de zinc, de cuivre, d'argent, d'or, il faut placer des lames positives de zinc, de cuivre, d'argent, d'or, à la partie inférieure. Si l'on ne peut remplir cette condition, il est nécessaire de diminuer l'intensité du courant de façon à éviter le plus possible les dégagements de gaz sur les lames conductrices.

Voici quelques-unes des conclusions auxquelles ont conduit les recherches sur la résistance des liquides :

1° Lorsque la longueur d'une colonne liquide est plusieurs fois plus grande que son diamètre, les lois II et III indiquées pour les métaux page 83 s'appliquent également aux liquides; ainsi la résistance à la conductibilité électrique est proportionnelle à la longueur et en raison inverse de la section.

Si l'on voulait appliquer ces lois aux cas où les dissolutions ne seraient plus renfermées dans des tubes, mais bien dans des bassins plus ou moins vastes, et où les électrodes au lieu d'avoir même section que les colonnes liquides seraient des lames plongeant à une certaine distance l'un de l'autre dans ces bassins, on ne trouverait aucun résultat exact. En effet, dans ces conditions, l'électricité, au lieu de suivre seulement la direction longitudinale de la

colonne liquide qui sépare les deux électrodes, passe de tous les côtés en quantité variable et donne lieu à des résultats très-compliqués.

2° Les liquides conduisent beaucoup moins bien l'électricité que les corps solides. Une dissolution de sulfate de cuivre à la température ordinaire, par exemple, offre une résistance seize millions de fois plus grande que celle que présente le cuivre métallique. En outre le liquide le meilleur conducteur est encore un million de fois plus résistant que l'argent métallique.

On peut citer comme exemples les nombres suivants qui représentent les pouvoirs conducteurs de différents liquides, rapportés à celui d'un cylindre d'argent qui aurait même diamètre (E. Becquerel) :

SUBSTANCES.	POIDS SPÉCIFIQUE.	TEMPÉRATURE.	POUVOIR CONDUCTEUR.
Argent....................	»	0°	100,000,000
Eau saturée de sulfate de cuivre....................	1,1707	9°,25	5,42
Eau saturée de chlorure de sodium, à 9°,50..........	»	13°,40	31,52
Eau saturée de nitrate de cuivre....................	1,6008	13°,0	9,00
Eau saturée de sulfate de zinc.	1,4400	14°,40	5,77
250gr. eau, 30gr. iodure de potassium..............	»	12°,50	11,20
Dissolution d'acide sulfurique au $\frac{1}{11}$ {eau.. 220c. cubes. acide. 20c. c.}	»	19°,0	88,68
Acide azotique ordinaire.....	»	13°,1	93,77
Protochlor. d'antimoine. 30gr. Eau.............. 120c. c. Acide chlorhydrique.. 100c. c.	»	15°,0	112,01 (*)

3° En général, le pouvoir conducteur d'une dissolution saline augmente avec la quantité de sel contenue dans la dissolution, mais cela n'a pas toujours lieu. Les dissolutions de sulfate de cuivre et de

(*) M. Pouillet avait indiqué les nombres suivants pour la conductibilité comparative de divers liquides :

Dissolution saturée de sulfate de cuivre...	1
— de sulfate de zinc...........	0,417
Eau distillée..........................	0,0025
Eau avec $\frac{1}{20000}$ d'acide azotique.........	0,015

chlorure de sodium sont des exemples de liquides dont la conductibilité croît avec le degré de concentration jusqu'au point de saturation. Mais il y a des sels déliquescents, ou qui se dissolvent en grande quantité dans l'eau, dont le pouvoir conducteur augmente d'abord avec le degré de concentration, atteint bientôt un maximum, puis diminue ensuite quand cette concentration augmente : le nitrate de cuivre et le sulfate de zinc sont dans ce cas. On peut donc avoir une solution saturée de ces derniers sels qui ont le même pouvoir conducteur qu'une solution très-étendue (E. Becquerel) (*).

4° L'élévation de température diminue beaucoup la résistance à la conductibilité des liquides, au lieu de l'augmenter comme dans les métaux; en outre, cette augmentation de conductibilité est beaucoup plus rapide. En effet, pour quelques-uns des liquides cités plus haut, les coefficients d'augmentation de conductibilité par suite d'une élévation de 1°, par rapport au pouvoir conducteur du liquide à 0°, sont :

Solution saturée de sulfate de cuivre....	0,0286
Solution étendue de sulfate de zinc.....	0,0223
Acide azotique ordinaire..............	0,0263

C'est-à-dire qu'en passant de 0 à 100°, ces dissolutions acquièrent une conductibilité environ trois fois et demi plus forte (en moyenne $1 + 100 \cdot 0,025$).

Dans les métaux au contraire, comme on l'a vu page 87, la résistance augmente à peu près entre les mêmes limites de température dans le rapport de 10 à 11 pour le mercure, et de 10 à 16 pour l'étain. Ce sont les deux limites extrêmes; les autres métaux sont intermédiaires.

(*) Pour les premières substances qui n'ont pas de maximum de conductibilité, et même pour les autres quand elles sont très-étendues, entre certaines limites, on peut établir une relation très-simple entre la résistance et la quantité de sel dissous à différents degrés de concentration. Cette relation est :

$$R = A + \frac{B}{q}.$$

R est la résistance à la conductibilité de la dissolution ; q la quantité de sel dissous dans l'unité de volume ; A, B, deux constantes pour un même sel et une température déterminée.

Cette formule ne doit pas être considérée comme exprimant la loi du changement de résistance, mais bien comme pouvant lier assez approximativement les résultats donnés par l'expérience entre certaines limites (E. Becquerel).

5° La conductibilité électrique des liquides semble liée au pouvoir que possède l'électricité de les décomposer ; toutes les circonstances qui facilitent leur décomposition facilitent le passage de l'électricité. Mais nous ne pouvons actuellement traiter la question de savoir de quelle manière cette conductibilité peut s'opérer ; nous ne nous occuperons de ce sujet que lors des décompositions chimiques dues à l'électricité.

Résistance des gaz. Si un certain nombre de corps solides et liquides laissent circuler l'électricité au travers de leur masse, les gaz, à la température ordinaire, sont rangés parmi les substances non conductrices. Les expériences sur lesquelles on se fonde pour établir ce fait sont les suivantes : si l'on dispose un ou plusieurs couples voltaïques isolés, et terminés par des conducteurs dont les deux extrémités sont placées en face l'une de l'autre, dans l'air ou dans un gaz, même à une distance fort petite, et que dans le circuit se trouve un galvanomètre extrêmement sensible, l'aiguille de celui-ci se maintient au zéro. En raréfiant le gaz de façon que les deux extrémités des conducteurs ne soient plus séparées que par un milieu très-raréfié, il n'y a pas non plus de transmission d'électricité, et le galvanomètre n'accuse aucune déviation. On suppose, bien entendu, que la pile se compose d'un petit nombre d'éléments, et que l'électricité n'ait pas une tension suffisante pour donner lieu à une décharge et pour laisser établir l'arc voltaïque entre les extrémités des fils métalliques. On sait, en effet, qu'avec un certain nombre de couples bien isolés, et à une très-petite distance dans l'air, à la température ordinaire, il se produit des étincelles entre les deux extrémités des conducteurs ; dans ce cas, c'est alors en vertu de l'excès de tension de l'électricité que les décharges ont lieu, et il ne s'opère pas une circulation continue dans le gaz, à la manière de celle qui s'établit dans les métaux et dans les liquides.

Sauf ces conditions particulières, on peut donc dire qu'à la température ordinaire et quelle que soit leur force élastique, les gaz ne permettent pas à un courant électrique provenant d'une pile à faible tension de passer au travers de leur masse ; mais si l'on examine avec attention quel est le mode d'action de la chaleur sur les corps, on peut arriver à d'autres conclusions.

On a vu, en effet, que la chaleur agit puissamment pour modifier la conductibilité des différents corps, mais que son action dépend de leur état physique. Les métaux éprouvent une diminution de conductibilité par suite d'une élévation de température ;

certains composés et les liquides, au contraire, donnent lieu à une augmentation de pouvoir conducteur. Il semble donc qu'en élevant la température des différents corps, leur pouvoir de conduire l'électricité tend à devenir de moins en moins différent, puisque les métaux qui sont les meilleurs conducteurs offrent une résistance plus grande au passage du courant quand on les chauffe, tandis que les sels fusibles et les liquides, qui sont moins bons conducteurs que ceux-ci, conduisent d'autant mieux que leur température s'élève davantage.

Mais comment les gaz sont-ils influencés par la chaleur? Sils sont isolants à la température ordinaire, livrent-ils passage à l'électricité à mesure que la température s'élève?

Erman a montré le premier que les flammes conduisent l'électricité à faible tension, et il a même trouvé qu'il y a inégalité d'action lorsque le conducteur plongé dans la flamme est électrisé positivement ou négativement. Dans la plupart des flammes un conducteur touchant au pôle positif d'une pile voltaïque isolée est déchargé complétement, et le pôle négatif acquiert son maximum d'action sur un électroscope à feuilles d'or; dans la flamme du phosphore, au contraire, l'inverse a lieu.

En plaçant dans la flamme deux petites spirales en platine, à une certaine distance l'une de l'autre et sur un même plan horizontal, afin qu'étant plongées toutes deux dans la flamme, et chacune d'elles communiquant à l'une des extrémités d'un couple voltaïque et d'un multiplicateur, l'électricité pût passer, au moyen de la flamme, entre les deux spirales, on est arrivé aux conséquences suivantes (Becquerel) :

1° Les deux spirales étant placées sur un même plan horizontal, dans la flamme d'une lampe à alcool, de façon à rougir sensiblement de la même manière, on a une déviation qui montre que le courant électrique passe entre les deux spirales. En faisant passer le courant en sens inverse, l'aiguille se dévie d'un même nombre de degrés dans l'autre sens.

2° Quand, à l'aide d'un chalumeau et d'une autre lampe à alcool que l'on tient à la main, on chauffe au rouge blanc une des spirales, si celle que l'on chauffe ainsi touche au pôle positif du couple, alors l'aiguille du multiplicateur se dévie beaucoup plus et marche vers 90 degrés; si la spirale surchauffée est négative, la déviation n'augmente que de quelques degrés.

3° Avec la flamme du soufre, un seul couple ne donne que 1

degré de déviation au galvanomètre; mais avec une pile à auge de trente éléments, on a une déviation de 30 degrés.

4° La flamme d'une bougie donne le même effet que la flamme d'une lampe à alcool.

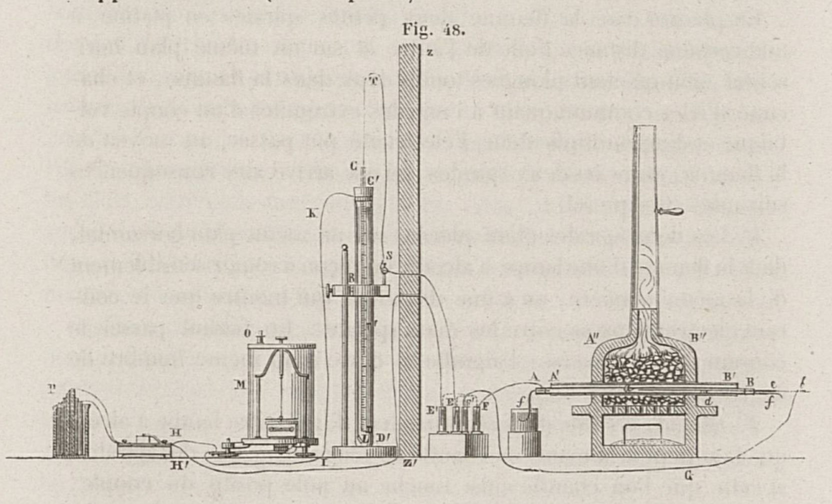
5° En brûlant de l'alcool contenant du chlorure de strontium, on sait que la flamme présente une coloration rouge indiquant la présence de la strontiane; on a alors, dans les mêmes conditions que celles du n° 1, une déviation par première impulsion de 45 degrés dans le galvanomètre, au lieu de 21 degrés que l'on observe quand l'alcool est pur.

Ces expériences mettent donc en évidence, indépendamment du pouvoir conducteur des flammes, l'augmentation d'effet que l'on obtient quand elles renferment un corps étranger, et aussi quand le conducteur positif est échauffé davantage.

Cette propriété que possèdent les flammes de conduire l'électricité à faible tension appartient également aux fluides aériformes portés à des températures élevées.

Afin de pouvoir élever la température des gaz soumis à l'expérience, et modifier facilement leur pression, on a fait usage de l'appareil suivant (E. Becquerel) :

Fig. 48.



AB est un tube en platine tiré à la filière et sans soudure, ayant 65 centimètres de longueur et 1 centimètre de diamètre intérieur; son épaisseur est telle, que l'on peut faire le vide dans l'intérieur sans le déformer, même quand une partie de sa longueur

est portée à la température rouge-blanc. Ce tube est renfermé dans un autre tube en terre A′ B′, qui traverse un fourneau horizontalement, afin que le charbon ne touche pas au platine. et que ce métal ne soit pas altéré.

Cette disposition permet donc d'échauffer un gaz au milieu du tube de platine; on peut en outre à l'aide de tubes de verre munis de robinet *f*, *f*, faire circuler le courant de gaz ou le raréfier dans l'intérieur de ce cylindre métallique.

Le tube de platine a presque toujours servi de conducteur dans ces expériences, mais, comme il est nécessaire d'un second conducteur, on s'est arrêté aux dispositions suivantes :

Quand on opère sur l'air, on se sert d'un fil de platine tendu au moyen d'un petit poids et maintenu par deux supports isolants placés, chacun d'eux, à plus d'un mètre du foyer de chaleur et dans le prolongement de la direction AB; ce fil passe dans l'axe du tube de platine AB, de sorte que si ce tube communique à l'un des pôles d'une pile, et le fil à l'autre pôle, du moment ou une circulation d'électricité s'établit dans le circuit, elle ne peut avoir lieu que par l'intermédiaire du gaz placé dans le tube, puisque, pendant tout le cours de l'expérience, le fil demeure parfaitement isolé, et que les supports isolants situés loin du foyer de chaleur restent toujours dans les mêmes conditions de température. On a fait usage également de deux fils de platine isolés parallèles servant d'électrodes, et passant, sans le toucher, au milieu d'un tube de porcelaine chauffé au rouge.

Quand on emploie d'autres gaz que l'air, tels que l'oxygène, l'hydrogène, etc., on prend pour conducteur d'abord le tube de platine AB, puis, au lieu du fil tendu, une tige de platine *ab*, également placée dans l'axe du tube. Mais cette tige a une longueur telle, qu'elle n'arrive que jusqu'au milieu de AB; elle est formée de platine contenant un peu d'iridium, afin qu'elle soit assez rigide pour qu'une partie de sa longueur étant portée à la température rouge, elle ne puisse se courber. Elle est maintenue isolée dans l'axe du tube, d'abord par le tube de verre isolant *e* soudé en *e*, au milieu duquel elle passe, puis à l'aide d'un petit anneau de verre garni de gomme laque *d*, et placé dans le tube de platine à une distance telle du fourneau B″ que la gomme laque ne soit pas altérée.

D'après cette dernière disposition, on ne peut craindre que la circulation de l'électricité s'établisse, à un moment donné, par le

petit support *d*, dont la température s'élève ; car, en opérant également avec le fil de platine isolé, on obtient les mêmes effets.

La pile P se compose d'un ou de plusieurs couples suivant les expériences, mais elle doit toujours être posée sur un support isolant. En HH' se trouve un commutateur destiné à changer le sens du courant de la pile.

Un galvanomètre M à long fil (24,000 tours), est placé à côté de la pile P. Il est nécessaire de lui donner une extrême sensibilité pour ce genre d'expériences.

Près du galvanomètre, se trouve un rhéostat CC' DD' d'une nature particulière, à cause de la grande résistance des gaz échauffés qu'il s'agit de mesurer. Ce rhéostat est formé simplement d'une colonne liquide d'un très-petit diamètre, dont on fait varier la longueur à volonté. Il se compose d'abord d'un gros tube de verre C'D' vertical, que l'on peut remplir de liquide. Un tube capillaire CD, parfaitement calibré, d'égal diamètre dans toute sa longueur, et divisé sur verre par demi-millimètres comme une tige de thermomètre, plonge dans cette éprouvette de manière à en occuper l'axe. Il est ouvert par les deux bouts, et se trouve maintenu à la partie supérieure C' du gros tube par un bouchon de liége. On comprend aisément qu'à l'aide de cette disposition, le liquide placé dans l'éprouvette C'D' pénètre dans le tube capillaire, et forme dans ce dernier une colonne d'égal diamètre dans toute sa longueur. Une lame métallique L de platine ou de cuivre, suivant les expériences, plonge dans l'éprouvette et vient se présenter à la base du tube capillaire ; elle est attachée à un fil métallique K qui vient communiquer au galvanomètre. Un long fil de platine STT', le plus rigide possible, est introduit dans le tube capillaire CD par la partie supérieure, de sorte qu'en l'enfonçant plus ou moins, on fait varier la longueur de la colonne liquide T' D comprise entre l'extrémité inférieure du fil de platine et la base B du tube capillaire. Le fil est attaché en S au support R, de manière qu'on peut interposer dans le circuit voltaïque, à l'aide des fils IK et ST, la colonne liquide T'D variable de longueur.

Actuellement, il est facile de comprendre le mode d'expérimentation adopté : le courant électrique développé dans P traverse le galvanomètre M, le rhéostat C'D', puis vient se présenter pour traverser l'intervalle qui sépare le tube de platine AB de la tige *ab* ou du fil tendu parallèlement suivant son axe. Si le gaz placé dans le tube transmet le courant électrique, le circuit se trouve fermé, et l'ai-

guille du galvanomètre se dévie. La déviation ainsi observée dépend de l'intensité de la pile, de la résistance du gaz renfermé dans le tube de platine, et de la longueur de la petite colonne liquide T'D du rhéostat. Si la pile et le gaz restent dans les mêmes conditions, on allonge ou l'on diminue cette colonne en élevant ou en enfonçant le fil dans le tube de verre divisé CD; alors la déviation de l'aiguille aimantée diminue ou augmente.

Supposons qu'au commencement d'une expérience on place un petit arc métallique en EE', alors le courant passe seulement par le galvanomètre et le rhéostat, et le gaz se trouve en dehors du circuit. La déviation de l'aiguille aimantée, dans ce cas, peut être amenée et maintenue à tel degré que l'on veut, en faisant varier la longueur de la colonne liquide. Admettons, par exemple, qu'on ait amené l'aiguille à vingt degrés : on note avec soin la position de l'extrémité T' du fil dans le tube de verre divisé. Si maintenant on ôte l'arc métallique EE', et qu'on introduise dans le circuit les fils métalliques F'G et FA, et le gaz intérieur qui transmet l'électricité, alors la résistance du circuit étant augmentée, la déviation de l'aiguille aimantée diminue; mais on abaisse l'extrémité T' du long fil de platine du rhéostat dans le tube de verre divisé CD, et la déviation de l'aiguille aimantée augmente de nouveau. Lorsqu'on est arrivé à un point tel, que la déviation de l'aiguille est à vingt degrés, comme précédemment, on est certain que, l'intensité du courant étant la même, la longueur de la colonne liquide comprise entre les deux positions de l'extrémité T' du fil est équivalente à la résistance du gaz contenu dans AB augmentée de la résistance au passage des fils métalliques F'G et FA dans le gaz, car la résistance propre des fils situés entre le fourneau et le commutateur n'est pas appréciable en présence des résistances que l'on évalue.

D'après cette méthode d'expérimentation, il est évident comme on vient de le dire, que l'on a en même temps et la résistance propre du gaz et la résistance au passage des conducteurs dans le gaz, en admettant que cette dernière soit mesurable en présence de la résistance du gaz.

Quand on opère ainsi, on trouve que les gaz conduisent les courants électriques lorsqu'ils environnent des électrodes métalliques parfaitement isolées et que leur température est suffisamment élevée. Les gaz acquièrent cette faculté à la température rouge naissant, et, à partir de cette limite, ils transmettent d'autant mieux l'électricité que leur température s'élève davantage ; ils livrent alors

passage même aux plus faibles courants électriques que l'on puisse produire à l'aide d'un couple de petite dimension.

Cette propriété est générale à tous les fluides aériformes. En opérant avec l'hydrogène, l'oxygène, l'acide carbonique, l'azote, le chlore, la vapeur d'eau, etc., comme avec l'air, on observe des effets analogues, mais plus ou moins marqués suivant leur nature.

La chaleur agit dans le même sens sur chacun d'eux, et inégalement; à mesure que l'on chauffe les gaz davantage, les rapports des nombres qui expriment leur résistance au passage des courants tendent sans cesse à se rapprocher de l'unité.

Les dimensions relatives des électrodes en platine qui servent à transmettre les courants électriques au travers des gaz ont une influence telle, que la proportion d'électricité qui passe est plus grande quand on augmente la surface de l'électrode négative. On observe un effet du même genre lors du passage de l'électricité dans les liquides.

La résistance d'un gaz à la transmission de l'électricité varie avec le nombre de couples de la pile et avec l'intensité du courant électrique qui le traverse.

Au-dessous de la température rouge, il n'y a pas de différence appréciable entre un gaz raréfié et un gaz à la pression ordinaire: l'électricité ne peut cheminer entre les électrodes métalliques isolées qui s'y trouvent plongées; au-dessus de cette limite, les différences commencent à se manifester, et le gaz dilaté transmet toujours mieux l'électricité.

Lorsqu'on diminue la force élastique de l'air ou d'un gaz porté à la température rouge, sa résistance diminue, et, une fois arrivé au plus haut degré de raréfaction que puisse produire la machine pneumatique, le milieu gazeux ainsi raréfié atteint son minimum de résistance, qui néanmoins est encore facilement appréciable. La diminution de force élastique dans chaque gaz, à égalité de température, rend leur résistance de moins en moins différente l'une de l'autre, et, quand on arrive à une faible pression de trois ou quatre millimètres de mercure (au vide de la machine pneumatique), tous les gaz raréfiés transmettent également bien les courants électriques.

Ainsi la chaleur agit dans le même sens que la diminution de pression pour donner aux gaz des pouvoirs conducteurs de moins en moins différents; mais néanmoins elle a une action propre bien évidente, puisque à la température ordinaire, dans le vide le plus

parfait que puissent produire les machines pneumatiques, il n'y a pas de transmission électrique appréciable, tandis qu'à la température rouge, l'électricité peut traverser un gaz, même quand il est condensé, alors que la masse soumise à l'expérience est plus grande.

Il est aisé de comprendre combien la comparaison des résistances des gaz est complexe, puisque ces résistances varient avec la température, la pression et l'intensité du courant qui passe dans le circuit; en outre, les résultats sont influencés par la nature des métaux qui servent à transmettre l'électricité dans les gaz, et il serait nécessaire d'éliminer la résistance au passage des électrodes, afin d'avoir l'action propre des gaz. Ne pouvant donner dans ce résumé les nombres relatifs aux différentes conditions des expériences, nous nous bornerons à citer, par ordre de résistance, les gaz qui ont servi aux observations faites à la température rouge-blanc et à la pression de l'atmosphère lorsque les électrodes sont en platine, ainsi que les limites entre lesquelles ils sont compris (la résistance de l'air est prise pour unité) :

Hydrogène (la résistance est comprise entre 0,3 et 0,4 de celle de l'air, suivant les circonstances des expériences);

Hydrogène protocarboné;

Oxygène (la résistance est comprise entre 0,5 et 0,7);

Chlore (la résistance ne dépasse pas 0,92);

Protoxyde d'azote } résistance peu différente de celle de l'air;
Azote............ }

Acide carbonique (résistance comprise entre 1, 2 et 2).

On peut se demander comment cette transmission des courants électriques au travers des gaz peut s'opérer ?

L'électricité ne peut traverser un milieu gazeux que par la conductibilité des particules fluides, ou à l'aide de décharges. Dans le premier cas, la résistance des gaz à la transmission des courants est toute physique et analogue à celle que les métaux et les conducteurs opposent au passage de l'électricité. Dans le second cas, cette résistance est en quelque sorte mécanique, et provient de ce que les molécules gazeuses font obstacle aux décharges électriques.

Il semble, de prime abord, que les résultats des observations soient difficiles à interpréter dans l'hypothèse de la transmission par conductibilité. En effet, dans l'état actuel de nos connaissances, on admet que l'électricité ne chemine dans les corps conducteurs

que par l'intermédiaire des particules matérielles; or, si les gaz transmettent l'électricité par conductibilité, comment se fait-il qu'en les raréfiant, alors qu'il y a moins de particules matérielles sur la route du courant, la conductibilité soit meilleure, et que, dans le vide, elle soit à son maximum? La quantité de matière étant moindre, la conductibilité devrait être également moindre.

Mais, si l'on adoptait l'hypothèse qui attribuerait le passage de l'électricité à des décharges au travers des gaz, il serait difficile de comprendre comment un très-faible courant électrique, qui ne franchit pas le milieu gazeux à la température ordinaire, se trouve transmis lorsque la température atteint le rouge. La force élastique du gaz étant la même à froid et à chaud, et l'excès de tension électrique ne changeant pas, on serait alors dans la nécessité d'admettre que la chaleur facilite la transmission de l'électricité dans un espace, même lorsqu'il est privé de matière, ou bien que les électrodes métalliques portées à la température rouge laissent détacher des particules matérielles, alors que l'excès de tension électrique est très-faible, et que ces particules établissent une circulation continue d'électricité. Dans l'état actuel de la science, l'une ou l'autre de ces deux conséquences ne paraissent pas admissibles, et surtout la seconde, car jusqu'ici aucune expérience ne justifie cette émission de particules métalliques de la part des électrodes.

D'un autre côté, la propagation par conductibilité moléculaire dans les gaz échauffés permet d'expliquer avec facilité non-seulement la transmission des courants au travers des flammes, mais encore ce résultat important, que les flammes interposées entre deux fils métalliques inégalement échauffés donnent lieu à un courant thermo-électrique, comme le ferait un conducteur métallique en communicatiou avec ces fils. Aussi, en rapprochant ces résultats de ceux qui se déduisent des observations précédentes, nous croyons plus probable l'hypothèse qui consiste à expliquer la transmission de l'électricité au travers des gaz chauds par voie de conductibilité.

Résistance au passage ou perte au passage. Lorsqu'un courant électrique traverse un circuit mixte composé de métaux et de liquides, plusieurs causes tendent à diminuer la quantité d'électricité qui passe : 1° les résistances propres des solides et des liquides, ainsi que nous l'avons vu précédemment; 2° les résistances qui se produisent au changement de conducteur, et qui proviennent de leur

différence de nature. Quand les conducteurs sont successivement solides et liquides, ces dernières proviennent en grande partie du transport des matières sur les lames, et principalement des gaz, c'est-à-dire de la polarisation de ces lames. Nous avons étudié les conductibilités propres des corps avec détail; il nous reste à dire quelques mots des *résistances au passage ou pertes au passage*.

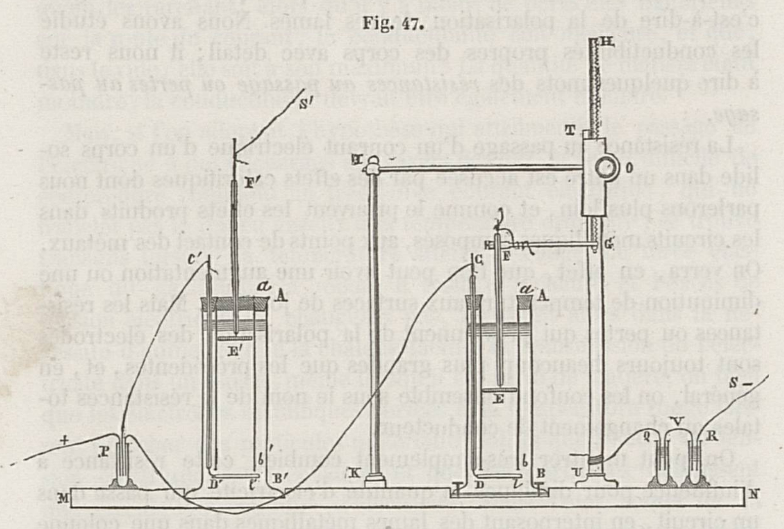
La résistance au passage d'un courant électrique d'un corps solide dans un autre est accusée par des effets calorifiques dont nous parlerons plus loin, et comme le prouvent les effets produits dans les circuits métalliques composés, aux points de contact des métaux. On verra, en effet, que l'on peut avoir une augmentation ou une diminution de température aux surfaces de jonction. Mais les résistances ou pertes qui proviennent de la polarisation des électrodes sont toujours beaucoup plus grandes que les précédentes, et, en général, on les confond ensemble sous le nom de la résistances totales au changement de conducteur.

On peut montrer très-simplement combien cette résistance a d'influence pour diminuer la quantité d'électricité qui passe dans un circuit, en interposant des lames métalliques dans une colonne liquide faisant partie de ce circuit, de façon que le courant d'un ou de plusieurs couples traverse non-seulement le liquide divisé, mais encore chaque lame perpendiculairement à leur surface. On trouve alors que quoique la résistance propre du métal introduit dans le circuit soit bien faible comparativement à résistance totale, cependant le courant diminue beaucoup d'intensité.

Le changement d'intensité du courant peut provenir d'un courant secondaire dû à la polarisation des lames, dirigé en sens inverse du courant de la pile et diminuant la force électro-motrice de celle-ci (Ohm, Delarive, etc.); ou bien elle peut résulter d'une résistance analogue à la résistance que le courant éprouve en parcourant un fil d'une longueur déterminée (Fechner, Poggendorf, etc.). Nous reviendrons, dans le livre suivant, sur ces deux hypothèses, à propos de la théorie des piles voltaïques; il nous suffit d'indiquer ici qu'en tout cas cette cause d'affaiblissement du courant peut être évaluée en longueur de fil (puisqu'en diminuant la longueur de la partie métallique du circuit dans les expériences précédentes on peut rendre au courant son intensité première), mais on arrive alors à cette conséquence, qu'elle est fonction de l'intensité du courant électrique lui-même.

A l'aide de l'appareil déjà décrit page 89 et représenté figure 47, on peut facilement déterminer la résistance totale au passage lors des changements de conducteurs. Il suffit de placer en V, au

Fig. 47.



lieu d'un fil d'une longueur fixe, un rhéostat, afin de pouvoir introduire dans le circuit une longueur variable d'un fil métallique normal. On détermine alors la résistance d'une longueur déterminée de la colonne liquide *ab* en fonction du fil normal du rhéostat; puis on enfonce la lame E jusqu'à ce que les deux lames DL et E se touchent. On reconnaît ainsi que la résistance du circuit mixte liquide et solide CDEF, est plus considérable que la résistance de la colonne liquide isolée EB, jointe à celle du conducteur métallique. La différence indique la résistance au passage.

On peut également, à l'aide d'une boussole des sinus ou des tangentes et en se servant d'un seul circuit voltaïque, mesurer l'intensité du courant dans chaque cas, et, à l'aide d'un rhéostat, ramener les déviations à la même intensité électrique; alors, à l'aide de la formule de la pile voltaïque qui sera donnée dans le livre suivant, on arrive à déterminer la valeur de la perte au passage ou force électro-motrice inverse, ainsi que l'ont fait les physiciens cités plus haut, auxquels il faut ajouter les noms de MM. Marianini, Worselman de Herr, Lenz, Marié, etc...

D'après les résultats obtenus, on peut déduire les conséquences suivantes :

1° Lorsqu'un courant électrique passe d'un solide dans un liquide, et *vice versa*, s'il n'y a pas de polarisation sur les lames (par exemple, si l'on opère avec le sulfate de cuivre en dissolution et deux lames de cuivre) et que la température ne change pas, la résistance au changement de conducteur est peu appréciable; mais si, par suite d'une polarisation, des gaz viennent se déposer à la surface de séparation des métaux et des liquides, alors la résistance acquiert immédiatement une valeur assez grande et facilement appréciable (E. Becquerel).

2° La résistance ou perte au passage, dans ce dernier cas, est fonction de l'intensité du courant; elle diminue à mesure que celle-ci augmente, mais de manière que, toutes choses égales d'ailleurs, le produit de la résistance par l'intensité du courant n'est pas un nombre constant (E. Becquerel, Marié, etc.) (*).

3° Dans la polarisation, chaque électrode donne lieu à une résistance qui peut être différente, et dont la somme constitue la perte au passage (Poggendorf, Lenz et Saweljev).

CHAPITRE IV.

Rapport entre les effets statiques et les effets dynamiques des courants.

Effets statiques des courants. Il n'a été question dans ce livre que de la production des courants électriques dans la pile voltaïque, et de leur propagation dans les corps solides, liquides et gazeux; mais il est nécessaire de revenir sur les effets statiques qui résultent de l'action des courants pour montrer les rapports existant entre les

(*) Quoique les valeurs obtenues ne soient pas exprimées exactement par une loi simple, cependant la formule $R = C + \frac{A}{i} + \frac{B}{i^2}$, dans laquelle R est la résistance au passage, i l'intensité du courant, et C, A, B, des constantes, représente assez bien les résistances de l'ensemble d'une colonne liquide et des deux lames qui y plongent. D'après M. Marié, le dernier terme est toujours négatif, et on a $R = C + \frac{A}{i} - \frac{B}{i^2}$ pour l'expression de la formule empirique à l'aide de laquelle on peut lier les observations.

états statiques et dynamiques sous lesquels se présente l'électricité.

On a vu dans le premier chapitre qu'un couple, et par conséquent une pile, pouvait charger un condensateur ; mais on peut prouver, de plus, qu'en opérant successivement et à des intervalles très-courts sa décharge, il en résulte une série de passages d'électricité donnant lieu à des effets semblables à ceux provenant du courant primitif lui-même. Il suffit d'opérer comme il suit (Guillemin) :

On prend une pile à colonnes de vingt à trente paires de cinq centimètres de diamètre, et placée sur un support isolant. On prend ensuite un condensateur composé de deux lames d'étain, d'un mètre ou deux de surface, séparées par une lame très-mince de taffetas ou de gutta-percha. On isole ce condensateur en le plaçant, comme la pile, sur un support en verre vernis à la gomme laque. Deux fils établissant la communication de chaque pôle de la pile avec une face du condensateur, on place dans le circuit formé par l'un de ces fils un commutateur circulaire composé de deux roues dentées fixées sur un axe de verre enduit de gomme laque. Les fils qui se rendent à ce commutateur sont disposés de telle manière que, lorsqu'on vient à le faire tourner, une des roues effectue la charge, l'autre la décharge du condensateur. On place enfin un galvanomètre très-sensible dans le trajet du circuit formé par l'autre fil ; il suffit alors d'imprimer un mouvement de rotation rapide au commutateur, de manière à avoir environ cent interruptions par seconde, pour voir dévier l'aiguille du galvanomètre de 30 ou 40 degrés, et même plus si l'on fait tourner le commutateur plus vite.

Il faut, pour que l'expérience réussisse, que le condensateur soit alternativement chargé et déchargé. Quand on se sert d'une pile à large surface et à petits nombres d'éléments, il faut employer une vitesse de rotation plus rapide, et une surface condensante plus étendue.

Ainsi la même quantité d'électricité sous forme de courant et qui, passée à l'état statique, charge le condensateur, lorsqu'elle traverse de nouveau un fil métallique servant à opérer la décharge reproduit le même effet magnétique. Il est donc bien évident que l'on peut accumuler l'électricité, ou la faire circuler librement d'une manière continue, si l'on n'interpose pas de condensateur.

Mais dans d'autres conditions, comme cela résulte des expériences de M. Faraday, l'électricité émanée des pôles d'une pile peut s'accumuler sur des conducteurs et donner lieu à des étincelles,

des décharges, comme l'électricité statique ordinaire. Pour mettre ce fait en évidence, on a employé de longs fils de cuivre recouverts de gutta-percha semblables à ceux qui sont à l'usage des télégraphes électriques (*). Deux fils d'une longueur de 160 kilomètres ont servi aux expériences : l'un était plongé sous l'eau de mer, et parfaitement isolé; l'autre enroulé sur le plancher d'une chambre, et par conséquent environné d'air.

On a employé une pile voltaïque isolée composé de 360 couples (chaque couple formé de disques de 10$^{\text{centi.}}$ sur 7$^{\text{centi.}}$,5), dont l'un des pôles communiquait au sol. Des fils métalliques servaient à mettre en communication le bout libre de la pile et le sol chacun avec une des extrémités du long fil sous-marin, ou du long fil placé dans l'air, les extrémités de ces deux fils venant aboutir dans la chambre où se faisaient les expériences.

Le pôle libre de la pile fut mis en contact avec le fil sous-marin et retiré, puis une personne touchant également le fil de décharge et le fil sous-marin, reçut une violente commotion. La secousse avait plus d'analogie avec celle provenant d'une pile voltaïque qu'avec la commotion donnée par une batterie de bouteilles de Leyde : elle dura un certain temps, et l'on put, par plusieurs attouchements légers et rapides, la diviser en un certain nombre de petites secousses; on obtint ainsi jusqu'à quarante secousses sensibles d'une seule charge du fil. S'il s'écoulait quelque temps entre la charge et la décharge du fil, la secousse était moins forte; elle était encore sensible après deux, trois ou quatre minutes, et même après un temps plus long.

Le fil sous-marin, après avoir été mis en contact avec la pile de 360 couples, ne jouit pas seulement de la propriété de donner au bout de quelques instants des commotions; l'étincelle qui en jaillit peut même enflammer de la poudre. Des fusées préparées ont pu ainsi faire explosion trois ou quatre secondes après la séparation du fil de la pile et du fil sous-marin.

Mais le moyen le plus propre à mettre bien nettement en évidence les différentes circonstances de ce phénomène curieux consiste à interposer un galvanomètre dans le circuit sous-marin, après que celui-ci a été séparé du pôle de la batterie avec lequel il avait été mis préalablement en communication; l'aiguille aiman-

(*) Le fil de cuivre avait 6$^{\text{milli.}}$,35 de diamètre, et le gutta-percha 2$^{\text{milli.}}$,11 d'épaisseur.

tée est alors fortement déviée. Le circuit agit encore sur le galvanomètre, quoique moins fortement, après un intervalle de quatre ou cinq minutes, et même vingt ou trente minutes après avoir été séparé de la batterie. Le galvanomètre isolé ayant été fixé d'une manière permanente à l'extrémité du fil sous-marin, et le pôle de la batterie étant amené en contact avec l'extrémité libre de l'instrument, on vit l'électricité, pour ainsi dire, se précipiter sur le fil; ensuite, quoique le contact fût continué, la déviation ne dépassa pas 5 degrés, le fil étant parfaitement isolé. Lorsque la batterie était séparée du galvanomètre, et que l'on touchait ce dernier avec le fil de décharge, la déviation de l'aiguille était inverse de celle qui avait lieu à l'entrée de la charge, et l'on pouvait dire que l'électricité se précipitait hors du fil.

Ces effets étaient produits également aux deux pôles de la batterie et aux deux extrémités du fil; et, soit que la communication électrique fût établie ou détruite au même bout ou aux deux bouts opposés du fil sous-marin, les résultats étaient les mêmes. Il faut opérer avec une pile voltaïque ayant une assez grande tension pour que ces expériences réussissent; une pile à courant constant de huit éléments, et qui décomposait rapidement l'eau, n'a donné lieu à aucune action de ce genre.

Quand on faisait usage du fil de même longueur (de 160 kilomètre) et qui était placé dans l'air, on ne voyait pas se produire la plus légère apparence des effets que nous venons de mentionner. Il est possible que des phénomènes analogues mais extrêmement faibles aient lieu, surtout en comparaison de ceux dont il vient d'être question. Cependant le fil était aussi bien et même mieux isolé que le fil placé sous l'eau, et aussi bon conducteur que lui.

Il est probable que, dans ces expériences, le fil de cuivre et l'eau forment les deux armatures d'un condensateur séparés par la couche isolante de gutta-percha entourant le fil. Ce condensateur a une étendue considérable, puisque la surface du fil est de près de 920 mètres carrés, et que celle de l'enveloppe extérieure d'eau a 3,670 mètres carrés, ou quatre fois plus d'étendue.

Le fil de cuivre se charge de toute l'électricité que le pôle de la batterie avec laquelle il est en contact peut produire. La tension de la charge statique obtenue n'est égale qu'à la tension du pôle de la batterie d'où elle est tirée; mais la quantité en est énorme, à cause de l'immense surface de cette espèce de bouteille de Leyde; il résulte de là que, lorsque le fil est séparé de la batterie et que

l'électricité s'écoule, elle a toute la puissance d'un courant voltaïque considérable, et donne des résultats tels que les machines ordinaires et les batteries électriques les meilleures ne seraient pas capables d'en produire de semblables.

Si le fil placé dans l'air ne produit aucun de ces effets, cela tient à ce qu'il n'a point d'armature extérieure correspondant à la couche d'eau, ou qu'il en a seulement une qui est trop éloignée (les murs, le plancher de la pièce dans laquelle on opère) pour donner lieu à une action inductive sensible capable de le charger.

Les phénomènes dont il vient d'être question montrent bien nettement l'identité de l'électricité statique et de l'électricité dynamique. On les obtient également lorsque les fils métalliques, au lieu d'être environnés d'eau, sont recouverts de gutta-percha, puis renfermés dans des tubes de plomb ou de fer, ou même placés sous terre. En effet, les conditions sont les mêmes que dans l'eau, et il se produit un condensateur entre les corps conducteurs séparés par la gutta-percha.

On a pu même, ainsi que l'a fait également M. Faraday, placer plusieurs galvanomètres dans le trajet du fil, par exemple, un au milieu de sa longueur et un à chaque extrémité, et examiner les effets produits dans chacun d'eux.

Lorsqu'on mettait un des pôles de la pile en contact avec le fil, au moyen du premier galvanomètre, cet instrument était affecté à l'instant; au bout d'un moment, le second l'était également, et le troisième ne l'était qu'après un temps plus long encore, et seulement quand tout le fil avait reçu la charge électrique; il fallait deux secondes au courant électrique pour attreindre le dernier galvanomètre au bout d'un fil de 240 kilom. de longueur. De plus, lorsque les aiguilles de tous les instruments étaient déviées (ce qui naturellement n'avait pas lieu d'une manière égale, à cause de la perte de l'électricité le long du circuit), si la communication avec la batterie était supprimée vers le premier galvanomètre, cet instrument tombait instantanément à zéro; mais le second n'y arrivait qu'un moment après, et le troisième seulement après un intervalle plus long encore; il y avait alors un flux d'électricité au bout du fil, tandis qu'il n'y en avait point au commencement. Si, après avoir établi, puis rompu la communication de la batterie avec le premier galvanomètre, celui-ci était immédiatement mis en rapport avec la terre, il se produisait encore de nouveaux effets intéressants : une partie de l'électricité qui se trouvait dans le fil

revenait, et, passant par le premier galvanomètre, le faisait dévier dans la direction inverse, de sorte que les courants s'échappaient des deux extrémités du fil dans des directions opposées, tandis qu'aucun courant n'y entrait; si le premier galvanomètre était rapidement mis en communication successivement avec la batterie et avec la terre, on observait un courant entrant d'abord dans le fil, puis ressortant à la même place, sans qu'il ait affecté les parties où se trouvaient les deux autres galvanomètres.

Lorsqu'on répète les mêmes expériences avec un fil suspendu dans l'air, d'égale étendue, on n'aperçoit, bien entendu, aucun de ces effets.

Ces expériences curieuses montrent bien que l'électricité à faible tension émanée des pôles d'une pile et en rapport avec un conducteur très-grand, si elle trouve d'après la disposition du conducteur à agir par influence sur un conducteur voisin, elle s'accumule peu à peu comme dans un condensateur, et ce n'est que lorsque la charge est opérée que la circulation de l'électricité se fait comme dans les circonstances habituelles.

Nous n'avons parlé que des effets observés avec des piles ordinaires; quand on fait usage de piles isolées d'un très-grand nombre de couples, il peut se produire entre les poles des étincelles en vertu de l'excès de tension des électricités; ce sujet ne sera traité qu'à propos de la lumière électrique.

Comparaison des effets statiques et dynamiques de l'électricité. Après avoir décrit les effets produits, il reste à indiquer comment on peut comparer l'électricité développée par les machines ordinaires avec celle produite dans les piles voltaïques. Cette comparaison peut être faite de différentes manières. M. Faraday a cherché séparément quels sont les effets produits de la part des décharges électriques et d'un couple voltaïque sur l'aiguille aimantée, et lors de décompositions chimiques opérées dans ces deux cas par l'électricité. Mais les résultats auxquels il a été conduit étant analogues à ceux qui sont donnés par la méthode indiquée par l'un de nous et que nous allons décrire, il est inutile de les mentionner ici. (Becquerel.)

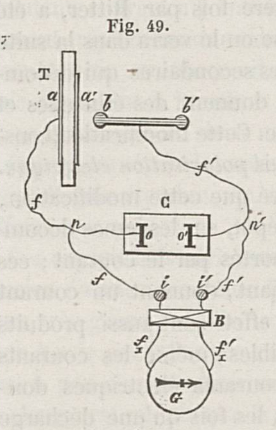
On verra dans le livre suivant que, lorsque deux lames homogènes d'un métal non oxydable tel que le platine ou l'or, sont mises en communication, chacune, avec l'un des pôles d'une pile, et plongent dans un liquide conducteur capable d'être décomposé par le courant, elles éprouvent une modification telle,

qu'elles sont aptes à produire un courant dirigé en sens inverse du premier, quand la pile est enlevée et qu'on ferme de nouveau le circuit. Cette modification, qui tend sans cesse à affaiblir l'action du courant primitif, observée la première fois par Ritter, a été employée immédiatement par lui, comme on le verra dans la suite de cet ouvrage, à la construction des piles secondaires qui décomposent l'eau, agissent sur l'électromètre, donnent des étincelles et excitent des commotions dans la grenouille. Cette modification constitue, en un mot, ce qu'on a appelé depuis *polarisation électrique*. Les recherches de l'un de nous ont prouvé que cette modification, ou plutôt cette polarisation, est due au dépôt, sur les lames décomposantes, des gaz et autres corps transportés par le courant; ces corps, en réagissant sur le liquide ambiant, donnent un courant dirigé en sens inverse du premier. Ces effets sont aussi produits avec les courants électriques les plus faibles, même les courants thermo-électriques. Non-seulement les courants électriques donnent lieu à des polarisations, mais toutes les fois qu'une décharge d'électricité ordinaire, quelque faible qu'elle soit, même celle qui est produite par un bâton de gomme laque frotté avec un morceau de drap, traverse de l'eau distillée au moyen de deux lames d'or ou de platine, ces deux lames sont toujours polarisées de manière à donner un courant dirigé en sens inverse du courant primitif; plus la décharge est faible, plus le multiplicateur avec lequel on observe le courant de polarisation doit avoir de sensibilité. Ces expériences tendent à montrer que la plus faible décharge électrique ne peut traverser un liquide sans le décomposer, et sans entraîner à sa suite par conséquent des éléments matériels.

Les appareils sont disposés de telle sorte, que les deux lames d'or plongeant dans l'eau sont mises alternativement en relation au moyen d'une bascule, d'abord avec les surfaces armées d'une batterie, puis avec les deux extrémités du fil d'un multiplicateur, aussitôt après que la décharge a eu lieu. La déviation de l'aiguille aimantée indique la direction et l'intensité du courant secondaire, et par suite l'intensité de la polarisation, mais dans certains cas seulement. Toutes les précautions doivent être prises pour que la décharge passe en totalité dans l'eau; on y parvient en isolant les diverses parties de l'appareil, à l'exception, bien entendu, de l'armature extérieure de la batterie. Le commutateur doit être disposé de telle manière que les deux circuits, celui qui sert à polariser et celui qui donne les effets de la polarisation, soient indépendants

l'un de l'autre, afin d'être bien assuré que toute la décharge passe dans l'appareil à lames d'or. La figure 49 indique la meilleure disposition à donner à toutes les parties du système.

Fig. 49.



T, batterie électrique ou carreau armé.

a, a', armatures.

b, boule de décharge du conducteur disposé comme l'électromètre de Lane.

c, couple à polariser; o, o', lames d'or.

f, f', fils de cuivre servant à établir la communication entre l'armature et les lames d'or.

T, a', b, f, f', c sont isolés avec des disques de résine ou de verre.

G, multiplicateur.

B, bascule.

f_1, f'_1, fils de cuivre établissant la communication entre le multiplicateur et le couple polarisé c.

i, i', capsules remplies de mercure, servant à établir la jonction des fils f et f_1, f' et f'_1.

Quand on polarise les lames o et o', les extrémités des fils f' et f_1 ne plongent point dans le mercure, de sorte que la décharge de la batterie parcourt le circuit $afoo'f'ba'$. Dès l'instant que la décharge est opérée, on plonge les extrémités des fils f_1 et f_1' dans les capsules à mercure, ou plutôt on fait jouer la bascule, et alors le courant résultant de la polarisation parcourt le circuit $oif_1Gf'_1i'o'$. Ce changement de circuit se fait, comme on l'a déjà dit, au moyen d'une bascule à laquelle sont fixées les extrémités des fils f_1 et f'_1. En faisant jouer la bascule, on plonge dans le mercure les extrémités de ces fils ou on les en retire. Cette bascule doit être manœuvrée rapidement, afin de ne pas diminuer sensiblement les effets de la polarisation. Les résultats sont toujours comparables, attendu que le circuit qui donne le courant de la polarisation, et dont le multiplicateur par conséquent fait partie, étant toujours invariable, la conductibilité ne change pas.

Enfin, on doit former avec soin la table des intensités pour chaque multiplicateur, laquelle donne immédiatement l'intensité du courant correspondant à une déviation donnée.

On a trouvé par expérience que, pour des décharges peu considérables, telles que celles que l'on peut obtenir avec un carreau

armé ayant $0^{m},60$ de côté environ, la polarisation, à en juger par le courant qu'elle produit, est proportionnelle à la distance explosive, et par suite à la quantité d'électricité qui passe dans l'eau où plongent des lames d'or, et que, pour une distance moitié moindre et une double décharge, les effets sont les mêmes que pour une distance double et une seule décharge.

Au delà d'une certaine intensité de décharge, la loi précédemment indiquée ne doit plus se vérifier. En outre, si l'on tarde quelques instants, après la décharge, à faire passer, dans le multiplicateur le courant de la polarisation, les gaz déposés sur les lames se dissipent peu à peu et le courant perd de son intensité; aussi doit-on opérer avec une grande rapidité, si l'on veut obtenir des résultats exacts.

Si l'on cherche ensuite les effets de polarisation produits sur deux lames d'or, plongeant dans de l'eau distillée et servant à transmettre un courant d'intensité constante provenant d'un élément formé d'une tête de pipe remplie d'amalgame de zinc et placée dans de l'eau distillée où se trouve une lame de platine, l'action polarisante n'étant plus instantanée, comme dans le cas de la décharge d'une batterie électrique, une portion de la polarisation disparaît, quand le circuit voltaïque reste fermé pendant un certain temps.

Pour arriver actuellement à la comparaison des effets dus à l'action de la bouteille de Leyde et du couple, on a comparé ensemble les effets de polarisation obtenus avec l'électricité ordinaire ou statique et l'électricité dynamique.

En s'entourant de toutes les précautions nécessaires et rapportant les effets à une batterie présentant une surface armée de 1 mètre ou 10,000 centimètres carrés, on a trouvé que, pour retirer 1 gramme de cuivre d'une dissolution de sulfate ou de nitrate de cuivre, il fallait 14,523,200 charges de cette batterie.

Cette même charge servirait à obtenir $0^{gr},25$ d'oxygène, quantité atomique proportionnelle à 1 gramme de cuivre. Par conséquent, pour décomposer 1 gramme d'eau et avoir $0^{gr},88$ d'oxygène, il faudrait mettre en mouvement 51,586,400 charges de la batterie ayant une surface armée de 1 mètre carré, charges qui ne sont pas, à beaucoup près, portées à leur maximum, puisque les décharges étaient effectuées quand la boule de l'excitateur était seulement à $4^{mill},51$ de distance de l'une des surfaces armées. La charge maximum avait lieu quand la distance explosive était d'environ

11^{mill},24. En rapportant la quantité d'électricité à celle qui est fournie dans le cas de la charge maximum, il faut que cette charge soit à 51,586,400 dans le rapport de 2 à 5, qui est le rapport inverse des distances explosives, les quantités d'électricité étant proportionnelles aux distances explosives; on trouve alors pour sa valeur, 20,063,456.

Ce nombre peut être considéré comme une limite. Il y a quelque chose capable d'effrayer l'imagination quand on voit que, pour décomposer 1 milligramme d'eau seulement, il faut 20,000 charges d'une batterie présentant une surface armée de 1 mètre carré, ou, ce qui revient au même, la charge d'un carreau armé ayant une superficie d'environ 2 hectares et donnant des étincelles d'un peu plus d'un centimètre de longueur.

La quantité d'électricité associée à l'oxygène et à l'hydrogène dans 1 milligramme d'eau seulement, et qui représente, si l'on peut s'exprimer ainsi, leurs affinités réciproques, serait donc capable de produire les effets de la foudre. Toute cette électricité est à l'état d'équilibre dans les corps, et ne devient libre qu'en partie dans les décompositions, parce que nous n'avons aucun moyen d'éviter les recompositions auxquelles on doit attribuer probablement les effets de chaleur dans les actions chimiques.

Cette quantité énorme d'électricité qui est enchaînée entre les molécules de 1 milligramme d'eau, peut servir à faire concevoir comment les poissons électriques peuvent, à volonté, disposer d'une charge considérable pour donner des commotions.

Il suffit, en effet, d'admettre pour cela que ces animaux possèdent la faculté de décomposer une quantité excessivement minime d'eau, de s'emparer de chacune des électricités qui deviennent libres, et de la conserver dans un organe particulier, pour en disposer ensuite à volonté.

Nous pouvons aussi expliquer, par la même raison, pourquoi une pile sèche, quand elle ne renferme plus qu'une quantité d'eau excessivement faible, peut encore servir à charger abondamment un condensateur.

Enfin, il est démontré aujourd'hui que les principes constituants de 1 gramme d'eau, ou des quantités équivalentes d'autres composés chimiques, renferment entre eux une puissance physique énorme, et dont nous devons chercher à nous emparer pour l'étude de la nature et les besoins de la société. (Comptes rendus de l'Académie des sciences, t. XXII.)

CHAPITRE V.

Vitesse de propagation de l'électricité.

Nous avons parlé jusqu'ici des courants électriques et des différences de conductibilité des corps, mais il est nécessaire d'indiquer avec quelle vitesse l'électricité se propage. Quant au mode même de propagation, on ne sait rien de certain sur ce point; nous nous reportons à ce que nous en avons dit dans le livre premier en parlant des hypothèses émises sur l'origine de l'électricité.

Lors des premières expériences faites avec la bouteille de Leyde, on chercha à s'assurer si la vitesse de transmission de l'électricité à une certaine distance pouvait être appréciée; les recherches d'Otto de Guéricke, de Grey, celles de Lemonnier, de l'abbé Nollet, faites avec une bouteille de Leyde dont la décharge passait dans un circuit formé par six cents personnes, montrèrent que le temps de la transmission de l'électricité d'une extrémité à l'autre de la chaîne n'était pas appréciable. Ce n'est qu'en 1834 que M. Wheastone fit connaître un moyen de mesurer la durée de l'étincelle; dès lors, on put se former une idée de l'énorme vitesse de propagation de l'électricité, qui est de l'ordre de grandeur de celle de la propagation de la lumière.

L'appareil à l'aide duquel M. Wheastone a déterminé la vitesse de l'électricité consiste en un miroir tournant autour d'un axe vertical avec une très-grande rapidité; on place en avant de ce miroir deux boules situées sur une même ligne verticale, et destinées à faire éclater entre elles une étincelle. Si l'on examine l'image de l'étincelle par réflexion dans le miroir quand celui-ci est fixe, on voit une ligne lumineuse verticale, parce que le passage rapide d'un point lumineux paraît une ligne continue, par suite de la persistance des impressions lumineuses sur la rétine. Mais si l'électricité met un certain temps à passer d'une boule à l'autre, et que le mou-

vement de rotation du miroir soit extrêmement rapide, alors l'étincelle devrait paraître une ligne inclinée dans le sens du mouvement de rotation. Pour réaliser cette expérience et afin d'augmenter la longueur de la route parcourue par l'électricité, on place verticalement au-dessus l'une de l'autre plusieurs systèmes de boules semblables aux précédentes et dans les mêmes positions vis-à-vis du miroir, puis on interpose le circuit métallique que parcourt l'électricité entre deux systèmes de boules. Alors l'électricité éprouvant un retard dans son passage à travers le fil, les images des étincelles sur le miroir tournant au lieu d'être sur la même ligne verticale, paraissent placées sur une ligne brisée. M. Wheastone put déduire de ses recherches que la vitesse de propagation dans un fil de cuivre était environ de 460,000 kilomètres par seconde.

Depuis cette époque, les dispositions des fils servant à la télégraphie électrique engagèrent plusieurs physiciens à employer ces longs circuits pour étudier la vitesse de propagation de l'électricité. En 1849, M. Walker, en Amérique, fit usage des télégraphes électriques pour déterminer les différences de longitude, et s'aperçut bientôt que la durée de transmission des signaux n'était pas négligeable, et indiquait une vitesse de propagation de l'électricité de 30,000 kilomètres par seconde, nombre quinze fois plus faible que celui donné par M. Wheastone.

MM. Fizeau et Gounelle entreprirent, en 1850, de nouvelles recherches sur les fils télégraphiques des chemins de fer de Paris à Rouen et de Paris à Amiens, en se servant du procédé suivant : On interrompait un courant à des intervalles très-rapprochés et simultanément dans deux points très-éloignés d'un conducteur, puis on observait dans un galvanomètre les déviations produites, lesquelles variaient avec le nombre des interruptions et devenaient maxima pour un nombre d'interruptions, et minima pour un autre. Les nombres qu'ils ont obtenus seront indiqués plus loin.

D'autres physiciens ont également cherché par différentes méthodes la vitesse de l'électricité dans les fils métalliques, et nous citerons entre autres MM. Guillemin et E. Burnouf, qui ont opéré par un procédé analogue à celui dont MM. Fizeau et Gounelle avaient fait usage, mais en se servant seulement d'un galvanomètre à un fil, et en ramenant à chaque interruption le fil conducteur à l'état naturel. Voici, du reste, une indication de leur mode d'expérimentation.

Soit un long fil métallique isolé et rectiligne: à l'une de ses extré-

mités, mais sans le toucher, se trouve l'un des pôles d'une pile voltaïque dont l'autre pôle communique avec le sol; à son autre extrémité, mais sans le toucher non plus, est fixé le fil d'un galvanomètre dont l'autre bout plonge dans la terre. Si au même moment on fait toucher un des bouts du fil à la pile [et l'autre au galvanomètre, le courant passe dans le fil, le parcourt, et parvient enfin au galvanomètre, dont il dévie l'aiguille. Or le courant met un certain temps à parcourir le fil : si la durée des contacts est assez longue, il franchit le second point de communication et dévie l'aiguille aimantée; mais, si les contacts durent trop peu, le courant lancé dans le fil n'arrive pas jusqu'au galvanomètre, et ce dernier reste immobile. En diminuant peu à peu cette durée, on devra arriver à un temps précis pour lequel toute déviation cessera : ce temps sera celui que l'électricité mettra à parcourir le fil.

En approchant de ce point, l'impulsion imprimée à l'aiguille par le peu d'électricité qui passe dans le galvanomètre sera très-faible, si on ne fait passer le courant qu'une seule fois dans le fil. Mais, en établissant et en supprimant les contacts un très-grand nombre de fois par seconde, on multipliera les impulsions, et on les rendra plus sensibles en les accumulant. Or le fil, durant chaque contact, se charge d'électricité; si dans les intervalles elle ne se décharge pas dans le sol, au contact suivant elle agira sur l'aiguille du galvanomètre, et cela indépendamment de la longueur du fil et de la vitesse du courant. C'est pourquoi, dès que le fil ne communiquera plus avec la pile ni avec le galvanomètre, il devra être mis en communication directe avec la terre, et il sera ainsi ramené à l'état naturel avant l'arrivée d'un nouveau courant. Cette décharge du fil permet d'accumuler les impulsions sur l'aiguille et de déterminer le zéro avec précision.

En opérant, par ce procédé, les interruptions et les communications avec le sol du fil de fer de 164 kilom. de longueur parallèle au chemin de fer de Toulouse à Foix, la déviation d'abord très-grande dans le galvanomètre, pour une vitesse de trois ou quatre tours du commutateur par seconde, décroît par degré jusqu'à vingt et un tours; elle est à ce moment moitié de ce qu'elle était au début, puis elle augmente régulièrement pour des vitesses de rotation plus grandes, et approche de la déviation première quand la vitesse est de quarante ou cinquante tours par seconde. Ainsi l'aiguille ne revient pas au zéro lors du minimum d'action; cet effet est attribué à un courant induit qui se manifeste dans les fils parallèles dont

se compose le circuit, et qui se produit toujours avec la même intensité dans toutes les circonstances.

Les déterminations faites jusqu'ici ont donné les résultats suivants pour les vitesses de l'électricité :

OBSERVATEURS.	DANS LES FILS DE CUIVRE.	DANS LES FILS DE FER.
	kilom.	kilom.
Wheastone (1834).............	460,000 par seconde.	» »
Walker en Amérique (1849).......	» »	30,000 par seconde.
O'Mitchell, id............	» »	46,000 »
Fizeau et Gounelle..............	180,000 »	100,000 »
Télégraphe de Londres à Bruxelles..	4,350 »	» »
Id. id. Édimbourg.	12,250 »	» »
Guillemin et E. Burnouf...........	» »	180,000 »

Ces différentes recherches ont montré en outre que les deux électricités se propagent avec la même vitesse ; que le nombre et la nature des éléments dont la pile est formée, et par conséquent la tension de l'électricité et l'intensité du courant, n'ont pas d'influence sur la vitesse de la propagation; que la vitesse de propagation ne paraît pas varier avec la section des conducteurs; et que dans le cuivre et le fer, à égalité de conditions, les vitesses ne sont pas proportionnelles aux conductibilités électriques.

Cette égalité de propagation de courants électriques de tension différente résulte aussi des expériences entreprises dernièrement par M. Latimer Clarke avec des tensions électriques qui ont varié de 31 couples à 500 couples à courant constant. Dans ces dernières recherches, le courant électrique entrant et sortant d'un long fil de 1235 kilomètres recouvert de gutta-percha, traçait des lignes bleues sur un papier mobile enduit de ferro-cyanure de potassium, comme dans le télégraphe électro-chimique de M. Bain dont il sera question plus tard. M. L. Clarke a trouvé une vitesse sensiblement égale à environ 1600 kilomètres par seconde, quelle que soit l'intensité du courant électrique.

On peut se rendre compte du peu de concordance des résultats compris dans le tableau précédent, si l'on se reporte aux observations de M. Faraday indiquées plus haut ; elles montrent que, suivant le procédé dont on fait usage et suivant les conditions dans lesquelles sont placés les fils métalliques, les résultats peuvent varier dans de grandes limites. On a vu en effet, dans le chapitre précédent, que si les fils sont isolés et plongés dans l'eau ou dans la terre, l'électricité qui est transmise au fil se porte immédiatement à sa surface

pour s'accumuler comme dans un condensateur, et que le retard éprouvé dans les actions magnétiques produites de la part du fil parcouru par ce courant sur une aiguille aimantée, donnerait une vitesse de propagation de l'électricité encore beaucoup moindre que celle qui a été indiqué plus haut. C'est ainsi qu'en comparant deux fils d'une longueur de 2400 kilomètres, l'un plongé dans l'eau, l'autre dans l'air, on a trouvé que le courant électrique a mis deux secondes pour traverser le premier d'un bout à l'autre, tandis que pour le second le temps a été presque inappréciable. Il résulte aussi des faits indiqués plus haut, que ce n'est pas dans une simple diminution de tension électrique qu'il faut chercher l'explication des effets observés par M. Faraday, puisque les courants d'inégale tension se transmettent également vite dans un même conducteur.

Dans les expériences faites sur la vitesse de l'électricité, il faudrait donc faire entrer en ligne de compte la manière dont les fils sont isolés et les effets d'induction qui peuvent se produire sur les côtés et qui sont capables de modifier les résultats obtenus. Ainsi, tout en admettant que la propagation de l'électricité est excessivement rapide, et que, dans l'emploi de la télégraphie électrique, elle est complétement à négliger, cependant on voit que des recherches nouvelles sont nécessaires sous le point de vue théorique.

LIVRE III.

CAUSES DU DÉGAGEMENT DE L'ÉLECTRICITE.

CHAPITRE PREMIER.

Du dégagement de l'électricité dans les actions mécaniques.

Possédant les moyens nécessaires pour reconnaître dans les corps la présence de l'électricité, soit libre, soit en mouvement, nous allons traiter la question du dégagement de l'électricité en général.

Le but que l'on se propose dans les expériences relatives au dégagement de l'électricité est de rechercher toutes les causes en vertu desquelles l'état d'équilibre des deux électricités est troublé dans les corps. Cette question se rattache à l'étude des phénomènes moléculaires; dès lors, sa solution est de première importance pour les sciences physico-chimiques. Dans le dégagement de l'électricité, la quantité obtenue est d'autant plus considérable qu'on a pris plus de précautions pour s'opposer à la recomposition des deux électricités au contact; conséquemment, plus les corps d'où elles s'échappent sont meilleurs conducteurs, plus il faut créer d'obstacles pour éviter leur recomposition. C'est en cela que consiste l'art de l'expérimentateur; et cependant, malgré les efforts faits depuis vingt ans pour le perfectionner, on ne peut en général recueillir qu'une faible portion des deux électricités devenues libres à l'instant où leur équilibre est rompu. On peut néanmoins dès à présent poser en principe, quel que soit le mode d'action employé, que lorsque la décomposition de l'électricité naturelle se fait plus rapiment que la recomposition, la tension des deux électricités dégagées augmente jusqu'à ce qu'il y ait équilibre entre la décomposition et la recomposition.

A part le but scientifique qu'on se propose quand on étudie le dégagement de l'électricité, il en est un autre très-important qu'on ne doit jamais perdre de vue; en effet, l'électricité étant un agent extrêmement énergique non-seulement comme puissance chimique, mais encore comme puissance mécanique, on doit s'attacher à rechercher les moyens les plus efficaces d'en recueillir la plus grande quantité. Cette question est du même ordre que celle qui concerne la production et l'emploi de la chaleur dans les arts, où l'on cherche les combustibles les meilleurs et les plus économiques, ainsi que les procédés les moins dispendieux pour recueillir la plus grande portion de chaleur dégagée dans l'acte de la combustion.

Jadis on considérait le dégagement de l'électricité comme un phénomène isolé ne se rattachant à aucun autre, et mettant seulement en évidence une propriété de la matière. Fabroni, et après lui Davy, sont les premiers qui aient essayé de démontrer que ce dégagement avait des rapports avec les affinités qui se manifestent dans le contact des corps. Depuis lors, le dégagement de l'électricité a été étudié, particulièrement dans ses rapports avec les actions chimiques: il en est résulté que l'on a reconnu la présence de l'électricité dans une foule de circonstances où on ne la soupçonnait pas même jadis.

On peut diviser les différentes causes du dégagement de l'électricité en quatre classes, comprenant les causes dues : 1° aux actions mécaniques proprement dites; 2° aux actions physiques; 3° aux actions chimiques; 4° aux actions physiologiques. Nous allons successivement les passer en revue. Nous commencerons par les causes dues aux actions mécaniques.

Les actions mécaniques comprennent le frottement, le clivage et la pression.

Frottement des corps solides mauvais conducteurs. Les effets électriques de frottement dans les corps mauvais conducteurs varient et dans leur nature et dans leur intensité, suivant des causes tellement légères, qu'elles échappent souvent à nos investigations.

Ne pouvant rattacher tous ces faits à des principes généraux, ce qu'il y a de mieux à faire est de s'en tenir aux propriétés fondamentales, qui seules peuvent nous servir de guides dans leur étude.

Supposons que l'on soumette d'abord à l'expérience des corps semblables, mais dont toutes les parties n'éprouvent pas également

l'action du frottement, afin de reconnaître les causes les plus influentes sur la production du phénomène. Lorsqu'on frotte en croix, l'un contre l'autre, deux rubans de soie blancs pris dans la même pièce, celui qui est frotté transversalement prend l'électricité négative, et l'autre l'électricité positive. Or les points du premier, éprouvant plus d'action de la part du frottement que les points du second, se trouvent par là soumis à un ébranlement plus considérable, et s'échauffent aussi plus que les autres. Ces deux causes exercent une grande influence sur la nature de l'électricité que prend un corps mauvais conducteur dans son frottement contre un autre corps également mauvais conducteur.

Deux rubans de soie noirs produisent les mêmes effets; en opérant avec un ruban noir et un ruban blanc, on obtient des effets dépendant de la couleur, en s'arrangeant toutefois pour que l'action du frottement soit le même sur chaque ruban, condition facile à remplir. En opérant avec deux tampons dont l'un est recouvert d'un morceau de ruban blanc, l'autre d'un morceau de ruban noir, et les frottant l'un contre l'autre, on trouve que le premier prend l'électricité positive et le second l'électricité négative; or, comme les deux étoffes ne diffèrent entre elles que par la matière colorante, il faut donc que celle-ci intervienne et dans le mode d'ébranlement des parties et dans la chaleur émise. Or la soie noire, qui a un pouvoir absorbant plus grand que la soie blanche, devant s'échauffer plus que celle-ci, se trouve dans une circonstance favorable pour acquérir l'électricité négative. En général, si, avant de frotter deux corps l'un contre l'autre, on élève préalablement la température de l'un d'eux, on augmente sa tendance négative.

Prenons encore deux corps semblables, mais ne différant que par l'état de leurs surfaces, tels que deux tubes de verre dont l'un est poli et l'autre dépoli, ou bien deux bâtons de gomme laque se trouvant dans ces mêmes états; si l'on frotte les deux premiers l'un contre l'autre, en ayant eu soin de bien les sécher auparavant et de les tenir pendant quelque temps dans un milieu desséché par le chlorure de calcium, le tube dépoli prend l'électricité négative. On voit donc que, dans le frottement de deux corps, celui dont les particules de la surface peuvent se déplacer plus facilement tend à prendre l'électricité négative.

En résumé, trois causes, en général, augmentent la tendance négative : un frottement plus grand, un accroissement de température

et une surface dépolie ou couverte d'aspérités, ou bien une constitution fibreuse. Ces trois causes prédisposent les molécules des corps à vibrer plus facilement. L'état des surfaces a une telle influence sur la nature de l'électricité dégagée, qu'il existe une substance minérale cristallisée, le *disthène*, qui prend l'électricité positive sur certaines faces, et l'électricité négative sur d'autres, avec le même frottoir, sans qu'on puisse apercevoir de différences sensibles dans l'état moléculaire des surfaces.

Si l'on examine ce qui a lieu avec des corps de nature différente, on trouve de même des résultats fort remarquables. Si l'on applique sur une planche de sapin bien sèche une feuille de papier également bien sèche, et qu'on passe rapidement sur cette dernière, avec frottement, un morceau de caoutchouc, le papier, qui est électrisé par le frottement, agit assez fortement par influence sur le bois pour y adhérer, de manière à faire éprouver une résistance quand on veut l'enlever. Si l'expérience se fait dans l'obscurité et dans une pièce très-sèche, on aperçoit une traînée lumineuse à l'instant de la séparation.

Un ruban de soie blanc chauffé prend toujours l'électricité négative dans son frottement contre un métal, tandis qu'en le laissant refroidir, il donne des signes très-faibles d'électricité positive quand le métal est très-poli.

Il n'en est pas de même d'un ruban de soie noir : chauffé ou non, il prend toujours l'électricité négative, quand il est soyeux et de bon teint, dans son frottement contre un métal.

On a vu précédemment qu'en frottant un ruban de soie blanc contre un autre de soie noire, le premier prend toujours l'électricité positive; mais si le ruban noir est usé et que le ruban blanc soit chauffé, ce dernier donne des signes d'électricité négative tant qu'il est chaud, et devient positif en se refroidissant.

Tous les résultats obtenus jusqu'ici tendent à prouver qu'outre les causes déjà signalées, les tissus, les fibres de matière animale et végétale, dont les parties sont plus ou moins lâches, et qui peuvent éprouver, par cela même, plus de déplacement dans le frottement que celles des surfaces métalliques, prennent plus habituellement l'électricité négative.

Quand les corps mauvais conducteurs sont en poussière, on obtient également des effets électriques dans leur frottement. Nous indiquerons plus loin, à propos des métaux, un procédé qui permet de reconnaître que le frottement du soufre, du minium, etc.,

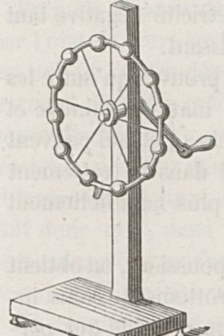
contre des lames métalliques dégage de l'électricité, car, les particules quittant la surface métallique aussitôt après le frottement, la recomposition au contact ne peut s'effectuer.

On peut citer l'expérience suivante pour montrer que le frottement de deux corps en poussière développe dans chacune des poussières une électricité différente. On place dans un soufflet un mélange de soufre et de minium bien sec, on promène ensuite successivement sur un gâteau de résine le bouton et la garniture extérieure d'une bouteille de Leyde légèrement chargée ; on trace ainsi sur la résine des lignes le long desquelles se trouvent des charges d'électricité positives et négatives. Si alors on insuffle avec le soufflet le mélange précédent, les poussières en sortant s'électrisent par frottement ; le soufre prend l'électricité négative, le minium la positive, et le soufre se porte sur les lignes tracées par le bouton de la bouteille de Leyde, le minium sur celles que la garniture extérieure a parcourues. Les premières sont jaunes, les secondes sont rouges. Cette expérience très-frappante, qui porte le nom de *figures de Lichtemberg*, montre bien nettement le développement de l'électricité qui résulte du frottement de deux corps en poussière.

Quand les corps mauvais conducteurs frottent contre le mercure, on obtient également des effets électriques, mais qui sont très-complexes ; nous allons les indiquer, parce qu'ils serviront encore à nous montrer l'influence qu'exercent sur leur production les causes déjà signalées.

Le dégagement de l'électricité dans le frottement du mercure contre le verre se démontre bien simplement en agitant un baromètre dans l'obscurité, le tube étant bien sec à l'intérieur. Quand la colonne mercurielle frotte contre les parois du tube, l'espace vide paraît lumineux ; en effet, les électricités qui se dégagent se réunissent au haut du tube, n'étant pas retenues par aucun excès de pression.

Fig. 49 bis.



On fait également usage d'un petit appareil qui montre le phénomène avec plus de simplicité ; il se compose d'une petite roue en verre, formée par un tube recourbé et renflé de distance en distance. Ce tube, avant d'être fermé, faisait partie d'une chambre barométrique, et, quand on a soudé au chalumeau la partie du tube de baromètre auquel elle tenait, on avait

eu soin d'y laisser une petite quantité de mercure. Une fois ce tube circulaire fermé, il est donc vide d'air et contient un peu de mercure. On adapte ce tube à un axe muni d'une manivelle, et ce système forme une petite roue que l'on met en mouvement avec la main. Si on la fait tourner ainsi dans l'obscurité, on voit une lueur se produire dans tout l'intérieur du tube, et même il éclate de petites étincelles là où le frottement du mercure est le plus considérable. La cause du phénomène est la même que dans le vide barométrique.

On peut développer de l'électricité par frottement contre le mercure en plongeant les corps brusquement ou lentement, ou bien en les enfonçant dans le mercure et les y laissant plus ou moins de temps. Les corps, avant l'expérience, doivent être maintenus constamment dans un flacon contenant de la chaux caustique. Voici les principaux résultats que l'on obtient en opérant ainsi :

Le verre, le soufre, le succin et la cire d'Espagne ne sont pas ordinairement électriques à la température de 10° par aucun de ces trois modes d'action : il en est de même jusqu'à + 18°, pourvu qu'ils soient à égalité de température avec le mercure. Cependant le succin commence à devenir électrique par le choc à plus de 11°, la cire d'Espagne à plus de 15°, et le verre à plus de 20° ; mais il faut avoir constamment l'attention de laisser ces corps dans le mercure assez de temps pour que l'équilibre de température s'établisse, et de les retirer ensuite lentement. Entre 80 et 100°, le pouvoir électrique s'éteint par immersion brusque, et, en général, une température élevée éteint le pouvoir électrique comme une température basse.

Ces résultats montrent de nouveau l'influence de l'ébranlement des particules et de la chaleur sur le dégagement de l'électricité, influence qui doit se faire sentir plus facilement sur le soufre, le succin et la cire d'Espagne, que sur le verre. Dans les expériences précédentes, les corps étaient à égalité de température avec le mercure ; mais, s'il y a une différence d'un degré seulement, tous ces corps deviennent électriques. Cependant il y a des limites ; car un cylindre de verre chauffé à 100° n'est pas électrique quand on le plonge dans du mercure à + 15° ; il en est encore de même en opérant d'une manière inverse. Une tige de verre, avons-nous dit, n'est pas excitable dans le mercure à égalité de température entre certaines limites ; au delà elle le devient. La nature de l'électricité varie encore suivant la différence de température entre les deux corps. La tige est positive lorsque sa température est un peu plus

élevée que celle du mercure ; elle est, au contraire, négative, lorsqu'il y a une plus grande différence.

En général, avec le succin, le soufre, la cire d'Espagne, les effets du choc sont plus marqués que ceux du simple contact ; on voit donc encore l'influence de l'ébranlement des parties pour exciter la puissance électrique.

Des substances composées de parties flexibles, telles que le coton, le papier et la laine, sont très-électriques par les trois modes d'immersion, depuis + 10° jusqu'à 80°, même à égalité de température avec le mercure. Il s'ensuit que la faculté électrique augmente avec la facilité qu'éprouvent les particules des corps à perdre leur position naturelle d'équilibre ; il suffit souvent d'un très-léger ébranlement, tel que celui provenant de la rupture de l'action attractive exercée par le mercure sur les corps, pour dégager de l'électricité. Examinons des cas encore plus compliqués.

Lorsque l'on frotte l'un contre l'autre deux corps qui n'ont pas le même degré de dureté, et que l'un d'eux cède, par conséquent, à l'autre une partie de sa substance, au bout de quelques instants, le frottement ne s'exercera plus entre les deux corps, mais bien entre le corps le plus tendre et la portion de ce corps qui a été déposée sur le plus dur. On a alors des effets électriques complexes, selon que le métal le moins dur est oxydable ou non ; de là une foule d'erreurs dans lesquelles sont tombés les physiciens qui se sont occupés de déterminer l'espèce d'électricité que prend un corps dans son frottement contre un autre.

Lorsque les métaux cèdent aux frottoirs, soit une portion de leur substance, soit de l'oxyde qui forme une couche sur le frottoir, dans ce dernier cas, le frottement a lieu entre le métal et son oxyde, qui est toujours négatif par rapport au métal. Mais quand la couche d'oxyde a acquis une certaine épaisseur, et qu'elle ne peut plus être enlevée, le frottement a lieu entre deux couches d'oxyde, et il n'y a pas d'effets électriques. En ayant égard à ces diverses circonstances, on peut expliquer les anomalies qui se présentent dans les expériences. Si l'on frotte doucement les métaux avec des corps tels que le liége et le caoutchouc, on enlève facilement la couche d'oxyde, et l'on obtient alors l'électricité positive sur les métaux. Ces résultats montrent combien il faut prendre de précautions dans les recherches relatives au dégagement d'électricité par frottement. Ces observations intéressantes sont dues à M. Delarive.

On a imaginé des appareils à l'aide desquels on recueille le plus possible des électricités dégagées dans le frottement de deux corps. Ces appareils, comme on l'a vu dans le livre premier, ont été appelés *machines électriques*.

M. Péclet a construit un de ces appareils dans le but d'étudier l'influence qu'exercent le temps, la vitesse et la pression sur le dégagement d'électricité par frottement.

Il paraît résulter de ses expériences : 1° que la vitesse et la pression étant constantes, la tension finit par le devenir ; 2° qu'en général, la tension est indépendante de la vitesse ; 3° qu'au delà d'une certaine limite, la pression n'influe pas sur l'électricité dégagée. Dans l'explication que ce physicien a donnée des faits observés, il a fait abstraction de l'électricité qui se recombine à la source même où elle se dégage, quand on ne met aucun obstacle à cette recomposition. C'est faute d'avoir négligé cette recomposition que d'autres personnes ont été également induites en erreur dans les explications qu'elles ont données des phénomènes produits dans le dégagement de l'électricité par frottement; en effet, on ne doit jamais perdre de vue les considérations suivantes : 1° lorsque la décomposition des deux électricités dans le frottement s'effectue plus rapidement que la recomposition, la tension électrique augmente; 2° si la recomposition se fait dans un temps appréciable, plus on tournera vite, plus la tension maximum augmentera. On conçoit parfaitement qu'il arrive un certain point, quand on tourne rapidement, où la tension de l'électricité dégagée est telle, qu'une portion des deux électricités se recombine malgré la mauvaise conductibilité des corps frottés; il en sera de même au fur et à mesure que la tension augmentera. D'après cela, l'on doit arriver à une tension maximum que l'on ne saurait dépasser, attendu que les deux électricités se recombinent toujours au contact, le frottement n'étant pas tellement instantané, que la séparation des deux corps ne puisse s'effectuer dans un temps infiniment petit. Voilà comment il faut entendre que le dégagement de l'électricité est indépendant de la pression et de la vitesse du frottement.

Dans les expériences précédentes on opérait dans l'air. Voyons ce qui arrive quand on opère dans le vide ou dans le gaz.

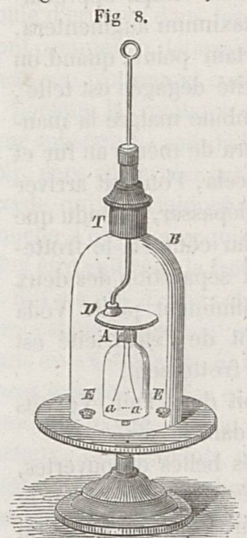
Dufay, auquel l'électricité doit l'une de ses belles découvertes, celle des deux électricités, a fait usage d'un récipient ouvert par le bas et fermé dans le haut par une boîte à cuir. Une tige de métal traversait la boîte, et entrait dans le récipient. Cette tige, à l'extré-

mité inférieure, était terminée en vis, dans les pas de laquelle était fixée, au moyen de filasse, une boule forée de succin, de verre ou de toute autre substance. L'extrémité supérieure de la tige était garnie d'une petite poulie que l'on mettait en mouvement au moyen d'un archet. Dans l'intérieur du récipient se trouvait une pince garnie d'étoffe ou de toute autre substance, qui embrassait et serrait le corps soumis au frottement; des fils suspendus dans le récipient indiquaient, en se portant vers ces corps, s'ils avaient été électrisés ou non. Dufay trouva que, dans le vide fait à six millimètres, tous les corps mauvais conducteurs, après leur frottement, attiraient ces fils comme dans l'air; Boyle confirma ce résultat.

On peut rendre compte des effets produits, en disant que les corps soumis à l'expérience, étant mauvais conducteurs, conservent, pendant plus ou moins de temps, l'électricité acquise par le frottement, lors même que l'air n'exerce plus de pression sur eux.

Le dégagement de l'électricité dans le vide a peu attiré l'attention des physiciens depuis le commencement de ce siècle, attendu que la théorie mathématique qui rend compte de l'équilibre de l'électricité sur la surface des corps tendait à rejeter toute recherche de ce genre. En effet, d'après cette théorie, l'électricité n'étant retenue à la surface des corps que par la résistance de l'air, on ne devait pas supposer qu'ils pussent conserver de l'électricité dans le vide, quelque faible que fût sa tension.

Fig 8.



Nous avons déjà rapporté dans le livre premier, page 15, des expériences faites avec l'appareil représenté figure 8, indiquant que l'action du corps électrisé doit intervenir, puisque, dans le vide, le petit électroscope A avec le plateau en verre électrisé par frottement D peuvent se maintenir électrisés.

Plusieurs physiciens se sont occupés successivement de la question du dégagement de l'électricité par frottement dans différents milieux, Wollaston d'abord, puis M. Gay-Lussac et M. Péclet.

Wollaston a cherché à prouver de la manière suivante que le dégagement de l'élec-

tricité dans le frottement était dû à une oxydation. Il a établi un petit cylindre en verre avec ses coussins enduits d'amalgame très-oxydable de zinc ou d'étain et ses conducteurs, dans un vase tellement disposé, qu'il pouvait enlever à volonté l'air qu'il renfermait et le remplacer par un gaz. Après avoir essayé le degré d'énergie de l'appareil dans l'air, il substitua de l'acide carbonique à l'air, et trouva que tout développement d'électricité était suspendu, et qu'il se manifestait de nouveau aussitôt que l'on introduisait l'air atmosphérique dans le vase. Ayant enduit les coussins d'un amalgame d'argent, de platine, d'un métal non oxydable enfin, tout dégagement d'électricité cessait; il en conclut que ce dégagement était dû à une oxydation.

M. Gay-Lussac répéta ces expériences, et trouva qu'il se dégageait également de l'électricité avec des amalgames très-oxydables dans une atmosphère d'acide carbonique, pourvu que ce gaz fût privé de la plus grande partie de son eau hygrométrique. Cette expérience ayant infirmé les résultats annoncés par Wollaston, de nouvelles recherches devenaient nécessaires pour fixer définitivement les idées à cet égard; c'est ce que fit M. Péclet, qui a été conduit aux mêmes résultats que M. Gay-Lussac.

Cette conclusion aurait pu être tirée immédiatement des expériences de Dufay, puisque le dégagement d'électricité a lieu dans le vide comme dans l'air. Il est prouvé par là que la présence de l'oxygène n'est pas nécessaire pour la production de l'électricité par frottement dans les machines électriques, mais nullement que celle-ci ne provient pas en partie d'une action chimique; car il pourrait se faire qu'il s'opérât des réactions chimiques entre les éléments constituants des amalgames, par suite du frottement, réactions qui pourraient servir à expliquer le dégagement d'électricité. Du reste, les effets fort compliqués qui se produisent dans le frottement des corps rendent bien difficile l'analyse des diverses circonstances de la production de l'électricité.

Frottement des corps solides conducteurs. Lorsque les corps frottés l'un contre l'autre sont conducteurs, il faut prendre certaines précautions pour observer des effets électriques de tension; sans cela, la recomposition des électricités suit immédiatement la décomposition, et il n'y a aucun effet appréciable. On opère alors comme il suit (Becquerel) :

L'un des deux métaux doit être réduit en limaille plus ou moins fine, mais non en poussières capables d'adhérer aux surfaces sur

lesquelles on les projette. On fixe une lame de métal, ou plutôt un plateau de métal, à l'extrémité supérieure de la tige verticale d'un électroscope à feuille d'or (voir p. 22); l'on tient au-dessus, dans une

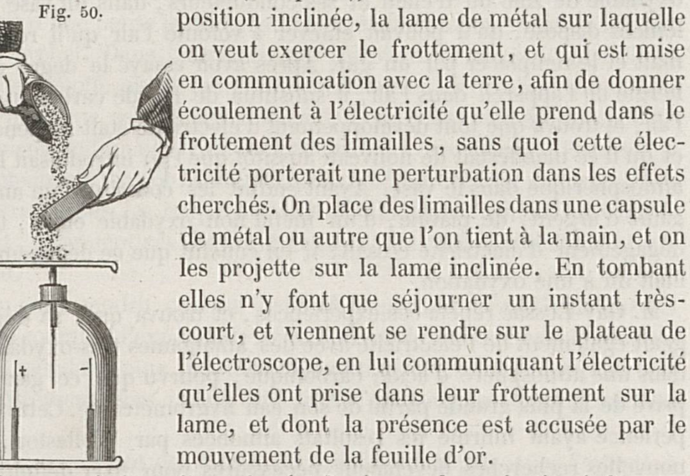


Fig. 50.

position inclinée, la lame de métal sur laquelle on veut exercer le frottement, et qui est mise en communication avec la terre, afin de donner écoulement à l'électricité qu'elle prend dans le frottement des limailles, sans quoi cette électricité porterait une perturbation dans les effets cherchés. On place des limailles dans une capsule de métal ou autre que l'on tient à la main, et on les projette sur la lame inclinée. En tombant elles n'y font que séjourner un instant très-court, et viennent se rendre sur le plateau de l'électroscope, en lui communiquant l'électricité qu'elles ont prise dans leur frottement sur la lame, et dont la présence est accusée par le mouvement de la feuille d'or.

Pour savoir jusqu'à quel point la vitesse de projection influe sur les effets électriques, il faut soumettre le frottement des limailles sur les lames, à un mode d'action plus régulier qui permette d'opérer dans les mêmes circonstances : on place un mouvement d'horlogerie sur le plateau de l'électroscope; ce moteur peut imprimer un mouvement de rotation rapide à une tige verticale, à l'extrémité supérieure de laquelle est fixée une lame de métal horizontale. Lorsqu'on projette sur cette lame des poussières quelconques, elles sont lancées aussitôt à une distance qui dépend de la vitesse de rotation de la lame mobile; leur contact a été donc de très-courte durée, mais, comme l'appareil est placé sur l'électroscope à feuilles d'or, celui-ci accuse aussitôt l'électricité que la lame en mouvement a prise à la limaille, pendant le temps très-court que le frottement a duré.

Voici les résultats obtenus avec diverses limailles : la limaille d'un métal, en tombant sur une lame de ce métal, prend un excès d'électricité négative, et la lame un excès d'électricité contraire. L'effet est d'autant plus marqué que la limaille est plus fine et le choc plus rapide. Les métaux en limaille se comportent donc, par rapport aux métaux en masse, comme les corps dépolis relativement aux corps polis dans les phénomènes de frottement. Cette propriété est moins sensible avec l'or, l'argent et le platine qu'avec les métaux oxydables.

La limaille de cuivre est négative avec les lames de zinc, de plomb, d'étain, de fer, de bismuth, c'est-à-dire, avec les métaux plus oxydables que le cuivre, tandis qu'elle ne donne aucun signe d'électricité avec le platine, l'or et l'argent.

En soumettant d'autres limailles à l'expérience, et comparant les résultats, on est conduit à admettre que les métaux en limaille, quand ils tombent sur une lame de métal, ont une grande tendance à prendre l'électricité négative, mais que cette tendance n'empêche pas que la limaille d'un métal oxydable ne soit positive, par rapport aux métaux les moins oxydables. On trouve effectivement que le zinc en limaille est positif, par rapport aux substances en lames dont les noms suivent : le platine, l'or, l'argent, la plombagine, le persulfure de fer, le cuivre et l'étain; il est négatif, au contraire, par rapport au zinc, au bismuth, à l'antimoine et au fer, mais plus fortement avec le premier qu'avec les autres; il ne donne enfin aucun signe d'électricité avec le peroxyde de manganèse.

Les oxydes métalliques ainsi que leurs sulfures sont négatifs par rapport à leurs métaux respectifs. Il faut éviter, nous le répétons, que les poussières soient trop fines; sans cela, elles adhèrent aux surfaces, et les effets de frottement sont nuls.

Lorsqu'on fait varier la température des lames ou des limailles, et principalement celle de la limaille de zinc et de peroxyde de manganèse, on trouve qu'à mesure que l'on élève la température, soit de la limaille de zinc, soit de la limaille et des lames, les résultats sont inverses de ce que l'on obtient à la température ordinaire, de sorte que la chaleur exalte le pouvoir négatif de ces substances divisées. La tendance de la limaille de zinc pour devenir négative par élévation de température, montre que la chaleur agit comme le fait ordinairement la division des parties, quand on opère avec des limailles de plus en plus fines.

Pour interpréter ces résultats généraux, il faut prendre en considération, 1° la force d'agrégation; 2° la différence d'ébranlement qu'éprouvent les molécules des surfaces des limailles et des lames; 3° l'oxydation des métaux; 4° l'influence de la chaleur dégagée; 5° l'action des métaux les uns sur les autres.

Les faits que nous venons d'exposer tendent à montrer qu'en général les causes qui président au dégagement de l'électricité dans le frottement des limailles sur les lames de métal se rattachent à l'état d'agrégation des molécules, et que, s'il était possible d'iso-

ler une particule d'un métal quelconque, et qu'on la laissât tomber sur une lame de ce métal, cette molécule serait éminemment négative.

Lorsque les métaux, au lieu d'être en limaille, sont en masses, s'il n'y a pas d'effets de tension appréciables lors de leur frottement, on peut alors observer néanmoins des courants électriques en se plaçant dans les conditions suivantes (Becquerel) : on soude à chacun des bouts du fil d'un multiplicateur à fil court une plaque de métal différent, et l'on passe chaque bout dans un bouchon de liége évidé, de manière à pouvoir enchâsser dans le liége la soudure, ainsi qu'une portion de la plaque; on mastique celle-ci sur le bouchon, afin de ne pas l'échauffer par le contact de la main. Si l'on pose l'une sur l'autre les deux plaques, il n'y a aucun effet produit à égalité de température; mais, pour peu qu'on les fasse glisser légèrement avec frottement l'une contre l'autre, chacune d'elles prend un excès d'électricité contraire dont la recomposition par l'intermédiaire du fil du multiplicateur donne naissance à un courant électrique. En soumettant ainsi un certain nombre de plaques métalliques ou autres, on forme le tableau suivant, dans lequel chaque substance est négative par rapport à celles qui la suivent, et positive par rapport à celles qui la précèdent :

Bismuth, palladium, platine, plomb, étain, nickel, cobalt, cuivre, or, argent, iridium, zinc, fer, cadmium, arsenic, antimoine, anthracite, peroxyde de manganèse.

On voit que la plupart des substances qui jouissent à peu près des mêmes propriétés physiques et chimiques, ou qui se trouvent associées ensemble dans la nature, sont placées à côté les unes des autres; nous citerons le palladium et le platine, le plomb et l'étain, le nickel et le cobalt, le cuivre et l'argent, le zinc, le fer et le cadmium ; l'iridium fait exception. Ce rapprochement n'est pas sans intérêt, puisqu'il tend à montrer que les propriétés électriques des corps ont des rapports plus ou moins directs avec leurs propriétés physiques ou chimiques. On verra plus loin que cet ordre est le même que celui obtenu avec des circuits composés de deux métaux semblables, quand on élève la température des points de jonction; la chaleur doit donc intervenir dans les effets produits, mais les effets complexes qui ont lieu dans le frottement ne permettent pas de distinguer si elle est la seule cause des phénomènes.

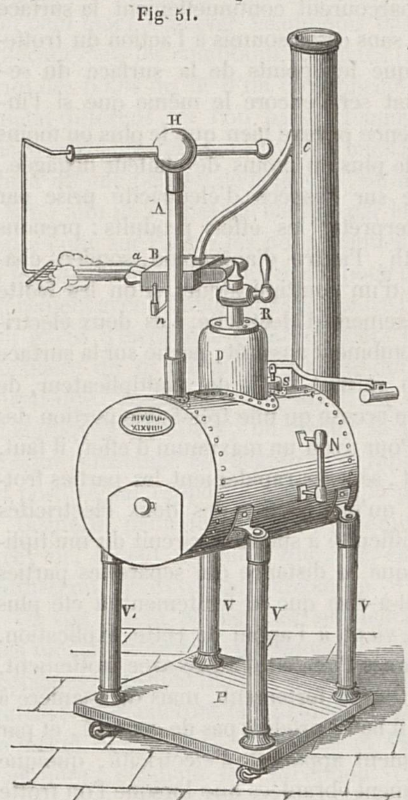
Voici encore quelques-uns des résultats que l'on observe d'après ce mode d'expérimentation :

Les effets étant les mêmes quand les surfaces sont dépolies, ils doivent dépendre par conséquent de la nature particulière de chaque métal. Si, au lieu de plaques, on opère avec cylindres de fer et de cuivre d'un décimètre de longueur, de manière que les mêmes points de l'un d'eux parcourent continuellement la surface du second, ces points, étant sans cesse soumis à l'action du frottement, s'échaufferont plus que les points de la surface du second, et cependant le résultat sera encore le même que si l'inverse avait lieu. Cette expérience prouve bien que le plus ou moins de frottement, et par suite le plus ou moins de chaleur dégagée, n'exercent aucune influence sur l'espèce d'électricité prise par chaque corps. Tâchons d'interpréter les effets produits : prenons deux lames, l'une de bismuth, l'autre d'antimoine, soudées chacune à l'un des bouts du fil d'un multiplicateur; si on les frotte l'une sur l'autre, il y a dégagement d'électricité. Les deux électricités, devenues libres, se recombinent aussitôt, partie sur la surface même du contact, partie en suivant le fil du multiplicateur, de sorte que l'aiguille aimantée n'accuse qu'une très-faible portion des électricités devenues libres. Pour avoir un maximum d'effet, il faut, tout en maintenant le contact, séparer rapidement les parties frottées : on conçoit, en effet, qu'une portion des deux électricités éprouve d'autant moins de difficulté à suivre le circuit du multiplicateur pour se recombiner, que la distance qui sépare les parties frottées est plus grande, c'est-à-dire que le frottement a été plus rapide. L'expérience suivante vient à l'appui de cette explication. Au lieu de passer les deux lames l'une sur l'autre avec frottement, si on les presse ou qu'on les frappe fortement, mais de manière à éviter un frottement latéral, il ne se produit pas de courant, et par conséquent point de dégagement apparent d'électricité, quoique les surfaces soient plus fortement ébranlées que lorsque l'on frotte les deux lames légèrement l'une sur l'autre. Il faut donc, puisque les mêmes points des surfaces restent constamment en contact, que l'électricité dégagée sur chacune des lames n'ait pas besoin, pour se recombiner, de suivre le fil du multiplicateur, et que la recomposition s'opère instantanément au contact même des parties pressées.

Si l'on obtient des effets électriques dans le frottement de deux métaux hétérogènes, on les retrouve encore dans le frottement des molécules liées entre elles par la force d'agrégation. (Peltier.) Mais, dans ce cas, quand on frotte deux conducteurs de même métal lon-

gitudinalement, il se produit des phénomènes d'induction dus au déplacement des conducteurs par rapport à l'aimant terrestre, qui compliquent singulièrement les résultats. C'est pour ce motif que nous ne les décrirons pas ici.

Fig. 51.



Frottement des gaz et des vapeurs. Lorsqu'un jet de vapeur sort d'une chaudière, et en général quand un gaz, dans certaines conditions, éprouve un frottement contre les parois d'une ouverture par laquelle il sort, on observe un dégagement d'électricité. Ce fait remarquable, en raison de l'intensité de ses effets et des circonstances dans lesquelles il est produit, a été observé pour la première fois par M. Armstrong en 1840, dans l'usine de Sigdille près New-Castle. Depuis on a modifié les chaudières destinées à produire le phénomène, et on leur donne actuellement la forme que nous allons indiquer. La figure 51 représente le petit modèle que l'on emploie habituellement dans les cours de physique. La chaudière a 80 centimètres de longueur, 37 centimètres de diamètre, et donne des étincelles de 4 ou 5 centimètres sous 8 à 10 atmosphères de pression; on en a construit de plus grandes, dans lesquelles les effets sont beaucoup plus énergiques.

La machine est formée d'une chaudière en forte tôle, à foyer intérieur, supportée par quatre colonnes VVVV de verre, dont les extrémités inférieures reposent sur un patin à roulettes P. En N est un tube indicateur du niveau de l'eau dans la chaudière; la soupape S permet de laisser croître la pression jusqu'à 8 ou 9 atmosphères. On peut, du reste, à l'aide du poids, régler la pression avec laquelle

on opère. La prise de vapeur se fait sur le dôme D au moyen d'un robinet R. La vapeur, en sortant du robinet, se rend simultanément dans trois tubes parallèles dont les extrémités se voient en *a*, et qui traversent la boîte B. Cette boîte est remplie d'étoupe imbibée d'eau froide et destinée à refroidir un peu la vapeur, de manière à la charger de gouttelettes d'eau dont la présence est essentielle à la production du phénomène; un petit tube recourbé *n* sert à s'assurer que la boîte contient toujours de l'eau; comme d'ailleurs celle-ci s'échauffe par le passage de la vapeur dans les tubes qu'elle entoure, un tuyau *t* entraîne les vapeurs qu'elle émet dans la cheminée C.

Pour recueillir l'électricité produite dans le frottement de la vapeur humide contre les parois des petits cylindres de bois des ajutages *a*, on présente au jet de vapeur un peigne *p*, qui est supporté par une tige horizontale, mobile dans la boîte H qu'elle traverse, afin de pouvoir faire varier la distance du peigne aux orifices d'échappement. Le tout est d'ailleurs supporté par une colonne de verre A qui sert à isoler le peigne d'avec la chaudière sur laquelle on l'adapte ordinairement.

Fig. 51 bis.

Les extrémités des tubes *a* par où débouche la vapeur sont représentées dans la figure 51 bis, afin de montrer le passage de la vapeur et le frottement de celle-ci et des gouttelettes qu'elle renferme contre les petits cylindres de bois qui s'y trouvent contenus. Les cylindres en bois de buis E se trouvent placés entre les deux pièces en cuivre *a* et *a'*, *a'* entrant à vis dans la première. La vapeur, ainsi que le représentent les flèches, n'entre pas directement de façon à frapper le cylindre de bois, mais, par suite de la disposition d'une petite plaque de cuivre *a' a''*, elle contourne la face de la plaque *a'* qui regarde B, puis vient frotter contre le cylindre de bois non-seulement tout autour dans l'intervalle qui le sépare de *a*, mais encore au milieu, à l'aide d'une ouverture qui le traverse dans toute sa longueur.

On a reconnu qu'en plaçant dans la boîte en cuivre *a* des cylindres de différentes substances, bois, verre, métaux, etc., on obtenait les effets les plus énergiques avec les bois; parmi ceux-ci, le buis donne de très-bons effets.

D'après ce qui a été dit plus haut, la vapeur communiquant l'électricité positive à la boule H (fig. 51) et aux tiges qui sont en rap-

port avec elle, la chaudière se charge d'électricité négative en quantité égale. Si on ne veut recueillir que la première, il faut mettre la chaudière en communication avec le sol ; en approchant un excitateur à manche qui touche à la chaudière, de la pièce H, quand la vapeur sort, on excite des étincelles entre cet appareil et la boule H. Si l'on désire opérer avec l'électricité négative, on fait communiquer au sol la boule H, et on isole la chaudière ; alors celle-ci donne des étincelles en raison d'un excès d'électricité négative.

Il résulte des expériences faites par MM. Armstrong, Schafthoeutl, Faraday, et les différents physiciens qui se sont occupés de ce sujet, qu'il ne se dégage jamais d'électricité par le passage seul de la vapeur, mais bien lorsqu'il se trouve de l'eau mêlée avec elle. On a conclu de là que l'électricité est produite par le frottement des globules de l'eau contre les parois du cylindre, ou contre les substances qui s'opposent à leur sortie lorsqu'elles sont rapidement entraînées par le courant de vapeur. On conçoit très-bien par là comment il se fait qu'il se dégage d'autant plus d'électricité que la pression et la force de projection de la vapeur sont plus considérables, car on n'a pas à craindre alors que la vapeur mouille les parois, condition essentielle pour la production de l'électricité, qui s'opère de telle manière que généralement la vapeur ou l'eau est positive, et les solides quels qu'ils soient négatifs.

On comprend aisément que les effets doivent être modifiés par la forme, la nature et la température des orifices. La chaleur, qui s'oppose à la condensation de la vapeur, empêche le développement de l'électricité qui se manifeste promptement en refroidissant le canal d'une manière suffisante pour obtenir la condensation. Il n'y a de dégagement d'électricité qu'autant que l'eau est pure ; la présence d'une petite quantité de sel ou d'acide détruit la faculté ; en ajoutant de l'essence de térébenthine, les effets électriques sont inverses, c'est-à-dire que la vapeur est négative.

M. Faraday a montré, comme du reste on le savait déjà, qu'on obtient des effets semblables en substituant un courant d'air au courant de vapeur. Quand ce courant renferme de l'humidité, il y a dégagement d'électricité; quand l'air est sec, il y a absence d'effets; en mêlant à l'air des poudres sèches, il y a aussi dégagement d'électricité, dont l'espèce dépend de la nature des poudres.

Ces effets peuvent être observés en condensant de l'air, sous une assez forte pression, dans un vase à parois resistantes, ou même dans une fontaine de compression; mais alors les effets, quoique sensibles à un électroscope, ne sont pas aussi énergiques que ceux que l'on obtient avec les chaudières à vapeur; avec celles-ci il se produit une grande quantité d'électricité, et l'on charge rapidement des batteries électriques et des jarres. Cependant, quand on opère avec de l'air comprimé mélangé de gouttelettes d'eau, on observe des effets souvent contradictoires, qui tiennent à ce que la nature des parois influe sur la production du phénomène.

Nous citerons à cette occasion les expériences faites par M. Armstrong, en condensant de l'air sous une pression de huit atmosphères, dans un vase à parois très-résistantes, de la contenance d'un peu moins de sept litres, et muni d'un tube en verre par lequel l'air devait s'échapper : le vase fut placé sur un isoloir; Ayant tourné le robinet pour laisser échapper l'air, il n'obtint, la première fois, aucun résultat. Dans une seconde expérience, le verre devint si fortement négatif, qu'il put en tirer des étincelles de 8 millimètres de longueur. Cette expérience fut répétée souvent avec le même succès. L'électricité du vase, quoique ordinairement négative, comme la vapeur, était cependant quelquefois positive; aussi devait-il se présenter des cas où il n'y avait aucun dégagement d'électricité, quand le vase passait de l'état négatif à l'état positif. L'expérience réussissait mieux par un temps froid et légèrement humide, que lorsqu'il était sec et chaud. Cette circonstance est à noter, car elle conduit à cette conclusion que la présence de l'eau dans l'air est une des causes de la production du phénomène.

Dans cette expérience, il paraîtrait que l'influence de la présence de l'eau en vapeur est telle, que lorsque le récipient est parfaitement sec, et échauffé jusqu'à ce qu'on ne puisse y tenir la main, la sortie de l'air ne produit pas d'électricité. Si l'intérieur du récipient est humide, on ne peut faire disparaître les signes d'électricité qu'en élevant davantage la température; quand celle-ci est basse, la présence de l'eau contribue peu aux effets électriques.

En tout cas, il résulte des recherches faites sur le dégagement de l'électricité dans le frottement des gaz et des vapeurs contre des corps solides, qu'il est nécessaire que ces fluides aériformes soient mélangés de particules d'eau qui viennent frotter contre les parois des tubes de sortie ; sans cela, les gaz et les vapeurs seules ne donneraient lieu à aucun effet.

La machine décrite plus haut est analogue aux machines électriques ordinaires, et elle fournit rapidement une charge électrique suffisante pour de grandes batteries; son emploi est borné aux mêmes usages que ceux auxquels sont destinés les appareils qui donnent de l'électricité statique : il y a forte tension et faible quantité. (Voir livre Ier, page 26.)

Clivage. Lorsqu'on clive rapidement une lame de mica dans l'obscurité, on aperçoit une faible lueur phosphorique, qui est toujours accompagnée d'un dégagement d'électricité. On trouve effectivement que chacune des faces séparées possède un excès d'électricité contraire dont l'intensité est d'autant plus grande que la séparation a été plus rapide. Ce phénomène ayant toujours lieu, quelque mince que soit la lame de mica, on peut en conclure qu'il se reproduirait encore à la limite, c'est-à-dire, s'il était possible de séparer l'une de l'autre deux molécules. Ces faits prouvent deux choses : 1° que les molécules possèdent au moins deux faces douées de facultés différentes, car, sans cela, on ne verrait pas pourquoi une des lames donnerait une électricité et l'autre lame l'électricité contraire ; 2° que chacune de ces faces manifeste une polarité électrique à l'instant où l'on détruit la force d'agrégation. Les actions chimiques, comme nous le prouverons, conduisent aux mêmes conséquences. On trouve la même propriété dans toutes les substances rangées parmi les corps mauvais ou médiocres conducteurs. On peut donc poser en principe que, toutes les fois que l'on sépare deux molécules réunies en vertu de la force d'agrégation, chacune d'elles emporte un excès d'électricité contraire, pourvu toutefois que les corps auxquels elles appartiennent ne soient pas tellement bons conducteurs que la recomposition des deux électricités devenues libres suive immédiatement leur séparation.

Pour réussir dans ces expériences, il faut enlever aux cristaux la couche d'eau hygrométrique qui adhère ordinairement à leur surface, et porter rapidement les parties séparées dans l'électroscope de Coulomb. (Voir page 21.)

Deux lames de mica détachées du même cristal, rapprochées l'une de l'autre et légèrement pressées jusqu'à les faire adhérer, sortent de la compression chacune avec l'état électrique qu'elle possédait à l'instant du clivage. L'effet est particulièrement marqué quand on élève légèrement la température de la lame qui présentait l'état négatif en sortant du clivage.

Il est facile d'expliquer maintenant pourquoi l'on ne peut recueil-

lir d'électricité libre quand on broie dans un mortier d'agate des cristaux de substances conduisant mal l'électricité, car il y a recomposition immédiate des deux électricités contraires dégagées sur deux lamelles contiguës. C'est par le même motif que l'on n'obtient aucun effet électrique lorsqu'on brise les corps cristallisés irrégulièrement ou formés de parties groupées confusément, comme des tubes de verre, des bâtons de gomme laque, etc., etc. On conçoit de même pourquoi l'on n'observe aucun signe d'électricité libre dans le clivage d'un cristal conducteur de l'électricité, comme la galène, les pyrites et autres, attendu que la vitesse de séparation ne peut jamais être assez grande pour empêcher la recomposition des deux électricités à l'instant où elles se séparent. A défaut d'électricité libre, on pourrait constater la présence de cet agent au moyen des effets électriques des courants : à cet effet, le cristal devrait être mis en communication par deux points avec les bouts du fil d'un galvanomètre. Il est infiniment probable qu'en clivant rapidement le cristal, une portion des deux électricités provenant de la destruction de l'attraction moléculaire, en suivant le fil pour se recombiner, produiraient un courant qui réagirait sur l'aiguille aimantée.

Passons aux effets électriques produits lors de la destruction de l'attraction moléculaire entre deux substances hétérogènes. Si l'on verse dans un verre conique, préalablement chauffé, du soufre en fusion, et que l'on plonge dedans, avant qu'il soit refroidi, un tube de verre, pour retirer le soufre du verre, on trouve, après la solidification, que, lorsqu'on enlève le cône de soufre, le verre possède un excès d'électricité négative, et le soufre un excès d'électricité contraire. Le chocolat, l'acide phosphorique, après leur solidification dans un verre, donnent des effets semblables, ainsi que le protochlorure de mercure, lorsque, l'ayant fait sublimer dans le col d'un matras, on en sépare rapidement quelques portions avec un tube isolant à l'extrémité duquel se trouve un peu de cire molle. Nul doute que, dans ces expériences, l'effet ne provienne de la destruction de l'attraction exercée par les molécules des deux surfaces qui adhèrent l'une à l'autre. On est porté à croire que, lorsque le soufre s'attache au verre, il y a également production d'effets électriques que l'on ne peut reconnaître à l'aide de l'expérience, mais qui doivent être en sens inverse des précédents.

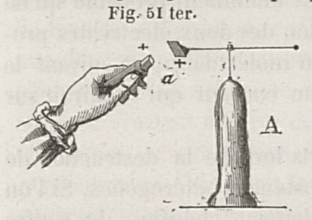
Pression. Il ne nous reste plus, pour terminer le dégagement de l'électricité dans les actions mécaniques, qu'à parler du dégage-

ment d'électricité par pression, c'est-à-dire des effets électriques qui ont lieu quand on presse deux corps l'un contre l'autre jusqu'au point de les faire quelquefois adhérer.

Libes est le premier qui ait observé qu'en posant sur un disque de bois recouvert de taffetas enduit d'une couche de résine élastique, un disque de laiton fixé à un manche de verre, avec la précaution de ne lui faire éprouver aucun frottement, si l'on presse légèrement le taffetas gommé, le disque de métal prend un excès assez considérable d'électricité négative : les effets sont inverses en pressant avec frottement; des disques d'argent, de zinc, etc., ont donné des effets semblables. Cette différence entre les effets de pression et ceux de frottement est des plus remarquables, et n'a pu être expliquée jusqu'ici.

Plus tard, Haüy trouva qu'un cristal de spath d'Islande et quelques autres substances minérales jouissent de la propriété de devenir électriques par la simple pression entre les doigts. On peut employer pour cette démonstration un petit cristal de spath d'Islande *a*, attaché à l'extrémité d'une petite aiguille de cuivre tournant à pivot sur une aiguille d'acier portée par un support isolant A. Après avoir pressé *a* entre les doigts, ce petit cristal se trouve chargé d'électricité positive, et on peut l'attirer avec un corps à l'état naturel. En lui présentant un autre petit cristal de spath d'Islande, fixé à l'extrémité d'un manche isolant et pressé préalablement, les deux cristaux étant chargés de même électricité, il y a répulsion.

Fig. 51 ter.



Mais cette propriété n'est pas aussi restreinte qu'Haüy le pensait, car elle appartient à tous les corps, même à ceux qui sont conducteurs, pourvu qu'ils soient isolés. Pour mettre le fait en évidence, on forme avec les substances que l'on veut essayer de petits disques d'une épaisseur de quelques millimètres, que l'on adapte à des manches parfaitement isolants; on prend un manche dans chaque main, et l'on presse les disques l'un contre l'autre; après les avoir retirés du contact, on les présente au disque de clinquant de l'électroscope de Coulomb préalablement électrisé: on trouve alors que les deux corps possèdent chacun une électricité contraire, pourvu toutefois que ces corps ou l'un d'eux soit mauvais conducteur. Le liége et le caoutchouc, pressés l'un contre l'autre, donnent, le premier l'électricité positive, le second l'électricité négative. (Becquerel.)

Les substances minérales cristallisées ayant un aspect vitreux, telles que la chaux sulfatée, la chaux fluatée, la baryte sulfatée, prennent l'électricité positive quand elles sont pressées avec le disque de liége. Des fruits, tels que l'orange, comprimés par un disque de même nature, lui communiquent au contraire un excès d'électricité positive : à mesure que le fruit se dessèche et perd de son élasticité, la faculté de s'électriser diminue.

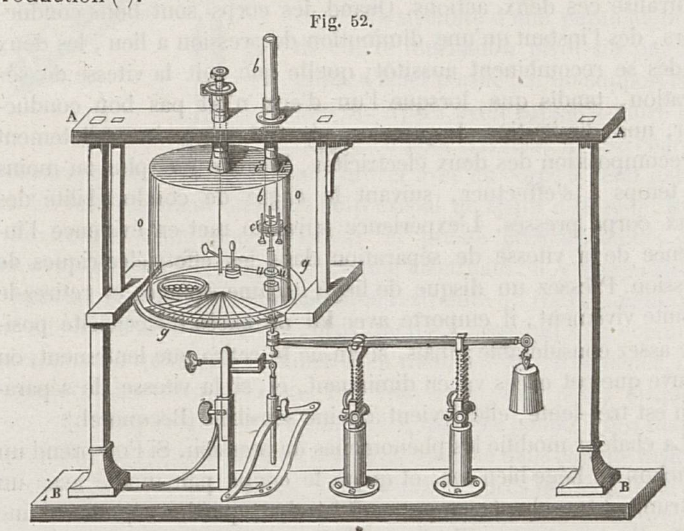
Plusieurs causes tendent à modifier le dégagement de l'électricité par pression : la première est le plus ou moins de conductibilité des corps. Si l'on emploie, par exemple, un disque de moelle de sureau et un disque de métal, il n'y a aucun effet produit, et il en est encore de même toutes les fois que des substances pressées sont conductrices de l'électricité. Il paraît qu'à l'instant où l'on exerce la pression, il se forme un nouvel état d'équilibre entre les deux fluides qui composent le fluide naturel des molécules en contact : tant que dure la pression, ces deux fluides sont neutralisés l'un par l'autre ; ainsi, malgré leur attraction réciproque, leur tendance à passer d'un corps dans l'autre, ils trouvent dans la pression une force qui neutralise ces deux actions. Quand les corps sont bons conducteurs, dès l'instant qu'une diminution de pression a lieu, les deux fluides se recombinent aussitôt, quelle que soit la vitesse de séparation, tandis que, lorsque l'un d'eux n'est pas bon conducteur, une diminution de pression n'entraîne pas immédiatement la recomposition des deux électricités, laquelle met plus ou moins de temps à s'effectuer, suivant le degré de conductibilité des deux corps pressés. L'expérience suivante met en évidence l'influence de la vitesse de séparation dans les effets électriques de pression. Pressez un disque de liége sur une orange, et retirez-le ensuite vivement, il emporte avec lui un excès d'électricité positive assez considérable ; mais, si on ne le retire que lentement, on trouve que cet excès va en diminuant, et, si la vitesse de séparation est très-lente, elle devient à peine sensible. (Becquerel.)

La chaleur modifie les phénomènes de pression. Si l'on prend un bouchon de liége bien sec, et qu'on le coupe par moitié avec un instrument tranchant, en pressant les deux parties séparées l'une contre l'autre, assez ordinairement elles prennent chacune un excès d'électricité contraire ; mais il arrive souvent aussi qu'elles ne sont pas électrisées. Si l'on élève de quelques degrés la température de l'un des deux disques, celle de l'autre restant constante, on trouve que la partie chauffée prend à l'autre l'électricité négative. Deux

morceaux de spath d'Islande, à la même température, ne sont pas électriques par pression ; mais il suffit d'une différence très-légère pour leur donner cette faculté. A température égale, les deux disques de liége ne doivent leurs facultés électriques de pression qu'à une différence dans l'état de leur surface : celle qui a le plus d'aspérités prend toujours à l'autre l'électricité négative. L'état des surfaces dans les corps mauvais conducteurs influe aussi sur leur qualité conductrice, car le spath d'Islande, qui est rangé parmi les corps les plus mauvais conducteurs (puisqu'il conserve pendant des semaines entières l'électricité qu'on lui a communiquée), devient suffisamment bon conducteur quand on lui a enlevé son poli, pour qu'il soit nécessaire de l'isoler si l'on veut qu'il conserve son électricité pendant quelque temps. Les aspérités déterminent donc non-seulement l'espèce d'électricité que doit prendre un corps mauvais conducteur, mais elles modifient encore son pouvoir conducteur.

Pour mesurer les effets électriques de pression, il faut un appareil qui permette de varier à volonté les causes qui influent sur leur production (*).

Fig. 52.



On prend une balance de torsion que l'on place sur une planchette horizontale *gg*, recouverte d'une glace; cette planchette est

(*) Voy. Becquerel, *Traité de l'électricité et du magnétisme*, t. II, p 100.

suspendue, à l'aide de deux montants verticaux, à une travere AA d'un fort châssis en bois AABB ; la cloche *oo* de la balance est percée dans sa partie supérieure d'une ouverture *ii*, dans laquelle on fait passer un tube en cuivre qui descend dans son intérieur, et qui est maintenu sur la traverse horizontale par de fortes vis. A l'extrémité de ce tube, on fixe un appareil *cc*, composé de deux petits plans circulaires en cuivre qui peuvent se rapprocher ou s'éloigner au moyen de trois vis, et dont le plan inférieur est percé à son centre d'une ouverture de deux centimètres. C'est entre ces deux plans qu'on place le corps qui doit être soumis à la pression. Ce petit appareil communique au réservoir commun, par le moyen d'une chaîne métallique qui donne ainsi un écoulement à l'électricité. Lorsque l'on veut élever la température du corps, on verse dans le tube de cuivre *bb* un liquide chaud.

On pratique aussi deux ouvertures dans la planchette : l'une, d'environ un décimètre de diamètre, pour l'usage intérieur de la balance, peut être fermée à volonté avec une capsule en verre dont le bord est revêtu d'une douille à vis : cette capsule est aussi destinée à recevoir les substances qui absorbent l'humidité de la cloche. L'autre ouverture *uu* sert à passer un petit tube en verre recouvert d'un vernis à la gomme laque, et portant à son extrémité supérieure le corps qui doit presser celui qui est placé entre les deux plans circulaires ; ensuite, quand on veut exercer la pression, on pose ce tube, au moyen d'un petit support, sur l'une des extrémités d'un fléau de balance, dont l'autre est disposée pour recevoir les poids nécessaires à la production de la pression. L'ouverture pratiquée dans la planchette est suffisamment grande pour que ces mouvements ne soient pas gênés ; de plus, afin d'empêcher la communication de l'air extérieur avec celui de la cage de la balance de torsion, on fixe, au moyen d'un anneau, autour de l'ouverture un cylindre en baudruche, au milieu duquel passe le petit tube, et dont les dimensions sont telles, que la peau légère dont il est formé ne gêne nullement les mouvements du petit tube. Le fléau de la balance se hausse et se baisse à volonté à l'aide d'une vis de pression ; ensuite on dispose l'appareil de manière que le fléau soit dans une direction horizontale, lorsque les deux corps soumis à la pression ne font que se toucher. Les choses ainsi disposées, on exerce la pression ; puis, pour séparer les corps, on se sert de deux ressorts disposés de manière à recevoir une tension déterminée. Les ressorts, revenant à leur état primitif, entraînent avec

eux le fléau ; les corps se trouvent donc sortir de la compression avec une vitesse égale à la tension du ressort. Le corps placé à l'extrémité du tube étant sorti de la compression, il faut pouvoir le présenter au disque de clinquant suivant sa plus grande surface ; on y parvient en formant ce tube de deux pièces, et les réunissant au moyen d'une charnière à boulon. Passant ensuite ce tube qui est plein dans un autre tant soit peu plus large, les deux parties se trouvent en ligne droite ; veut-on présenter le corps au disque de clinquant, on retire un peu le tube de son enveloppe, et la partie supérieure trébuche aussitôt.

Le plus souvent, l'excès d'électricité acquis par chacune des substances au sortir de la compression est très-faible. Si l'on prenait, par conséquent, pour fil de torsion un fil d'argent, tel que Coulomb l'a employé dans sa balance, la répulsion serait peu sensible, et quelquefois même nulle ; il faut le remplacer par un autre qui ait une force de torsion bien plus faible. Les fils de platine d'une grande finesse, tirés à la filière à la manière de Wollaston, remplissent parfaitement ce but ; mais il faut avoir la précaution de choisir le degré de finesse convenable, car on s'est assuré que, lorsque ces fils ont atteint un certain degré de ténuité, la torsion d'un petit angle dérange assez l'état d'agrégation des molécules pour que celles-ci ne reprennent plus leur position primitive d'équilibre. Il en résulte que les oscillations d'un petit pendule horizontal suspendu à l'extrémité de ce fil ne sont plus isochrones ; on doit donc le rejeter.

L'expérience prouve que les intensités électriques croissent proportionnellement aux pressions, pour des pressions qui ne dépassent pas 10 kilogrammes. (Becquerel.) Cette loi s'étend-elle à des pressions plus élevées ? Il est difficile de répondre à cette question ; car nous ferons remarquer qu'il est probable que la quantité d'électricité que prend chaque corps pendant qu'on le comprime est dépendante du degré de l'attraction que les molécules des surfaces exercent les unes sur les autres ; mais comme on ne peut apprécier les rapports existant entre l'attraction et la pression, ou le rapprochement plus ou moins grand des molécules, il est impossible de déterminer les rapports entre les quantités d'électricité correspondantes. En outre, la difficulté de séparer instantanément les deux corps comprimés, sans passer par des pressions intermédiaires successives, rend pour ainsi dire impossible la détermination des rapports en question.

En considérant la manière dont le dégagement de l'électricité croît dans les corps par l'augmentation de la pression, ne peut-on pas y rapporter certains phénomènes lumineux dont on ne connaît pas encore bien l'origine ? On dit, par exemple, que dans les mers polaires il arrive souvent que des blocs de glace, en se heurtant, font jaillir de la lumière. Ces blocs énormes arrivent à la rencontre les uns des autres avec des quantités de mouvement considérables; leurs parties constituantes doivent donc éprouver une compression énorme qui les constitue dans un état électrique différent; mais, aussitôt que la compression a cessé, les deux électricités se recombinent ensemble pour former de l'électricité naturelle, et il en résulte une lumière plus ou moins vive, selon la tension de l'électricité dégagée.

CHAPITRE II.

Du dégagement de l'électricité dans les actions physiques.

Les actions physiques principales donnant lieu à un dégagement d'électricité, sont les actions dues à la chaleur et à l'induction magnétique. Comme la seconde classe de phénomènes ne peut être traitée qu'après avoir parlé des effets magnétiques, il n'en sera question que dans le troisième volume; nous exposerons ici les effets électriques produits par la chaleur dans les corps mauvais conducteurs et les cristaux, puis dans les corps conducteurs et les métaux.

Effets électriques produits par la chaleur dans les minéraux. L'expérience tend à démontrer que, quand les corps se dilatent ou se contractent, il y a trouble dans l'équilibre des forces électriques. Les effets observés dépendent de la constitution moléculaire des corps, de leur nature, et des conditions dans lesquelles on opère. Quelques substances minérales, telles que la tourmaline, la topaze, etc., sont électriques quand on les soumet à l'action de la chaleur, c'est-à-dire quand elles sont dans un état d'échauffement ou de refroidissement.

On peut démontrer simplement l'effet produit en prenant un

petit support en cuivre CD portant une chape et mobile sur un pivot *o* comme une aiguille de boussole. La tourmaline échauffée AB est placée sur ce support, et on peut approcher de chaque extrémité un corps conducteur, ou même successivement les deux extrémités d'une autre tourmaline A′B′ préalablement chauffée et tenue à la main en son milieu par une pince. On reconnaît en général qu'au bout de quelque temps que la tourmaline AB a été placée sur le support, chaque extrémité est chargée d'électricité contraire et que le milieu est à l'état naturel; ainsi on observe des effets d'attraction ou de répulsion, suivant que les pôles contraires ou de même nom des tourmalines sont en présence. On peut également porter la tourmaline échauffée dans l'électroscope de Coulomb, et montrer les effets différents produits par les divers points de sa longueur sur le petit plan d'épreuve électrisé.

Fig. 52 bis.

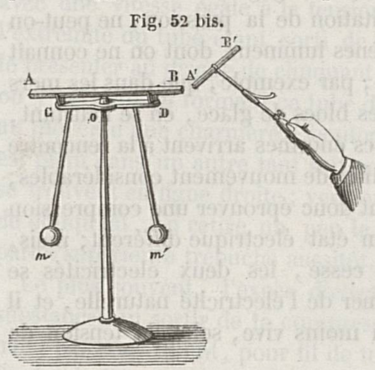
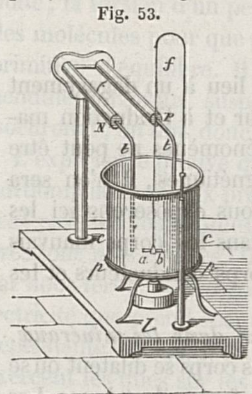


Fig. 53.



L'appareil suivant (fig. 53) est très-convenable pour observer les intensités électriques polaires de la tourmaline et des substances prismatiques. (Becquerel.) Il se compose d'une cloche en verre *cc*, ouverte par les deux bouts, et reposant sur une plaque de cuivre *pp*, qu'on échauffe au moyen d'une lampe à alcool *l*. Un fil de cocon fixé en *f*, et portant une chape de papier, descend dans la cloche; deux tiges verticales en métal *tt*, placées à une distance un peu plus grande que la longueur de la tourmaline, communiquent chacune avec les pôles opposés P, N, de deux piles sèches, dont les intensités peuvent être considérées comme sensiblement constantes pendant la durée d'une expérience. On met la tourmaline *ab* dans la chape, et on allume la lampe pour échauffer la plaque et l'air intérieur de la cloche, dont on connaît la température au moyen d'un thermomètre convenablement placé. A mesure que l'intérieur de la cloche s'échauffe, la température de la tourmaline s'élève, et aussitôt que celle-ci devient électrique elle

se place entre les deux tiges, les deux pôles inverses en regard, et, si on la dérange de cette position, elle y revient en exécutant une suite d'oscillations dont le nombre, dans un temps donné, sert à déterminer l'intensité de l'électricité.

Voici les résultats obtenus avec une tourmaline brune, légèrement translucide, de 3 centimètres de longueur et de 3 millimètres de diamètre, dont on a élevé graduellement la température :

A 50° la polarité électrique a commencé à être sensible, et le cristal s'est placé entre les deux tiges; elle a continué jusqu'à 150° et même au delà. On a éteint la lampe, la température a monté encore pendant quelques instants, en raison de la chaleur acquise par la plaque métallique; mais ensuite elle est devenue stationnaire : la polarité a disparu alors, et a reparu en sens inverse, dès l'instant que la température a commencé à baisser.

Le moment du passage d'une polarité à une autre a été très-court; les résultats obtenus par refroidissement dans une autre expérience sont consignés dans le tableau suivant :

TEMPÉRATURE de la TOURMALINE.	TEMPS des OSCILLATIONS.	NOMBRE des OSCILLATIONS.	INTENSITÉS.
100	30″	0	0
90	30	10	0,11
80	»	13	0,19
70	»	15	0,25
60	»	15	0,25
50	»	15	0,25
40	»	14	0,21
30	»	13	0,19
20	»	7	0,054

Interprétons ces résultats : la température avait été portée à 115°; à 105°, la tourmaline, quoiqu'elle fût électrique auparavant, a commencé à se fixer entre les deux tiges verticales qui communiquaient avec les deux pôles des piles sèches; à 100°, les oscillations étaient mesurables. Depuis 115° jusqu'à 100°, moment où le refroidissement était le plus rapide, l'intensité électrique croissait très-lentement; de 100° à 90°, l'accroissement de l'intensité a été rapide, puis il l'a été moins jusqu'à 70°; de 70° à 40°, il est resté sensiblement stationnaire; de 40° à 20°, il a diminué dans la même proportion qu'il avait augmenté depuis 100° jusqu'à 70°. La polarité électrique a disparu entièrement à 15°, quoiqu'elle n'eût

commencé à paraître qu'à 50°, quand on a élevé la température. Plusieurs tourmalines ont donné des résultats semblables. On voit donc que l'intensité électrique de chaque pôle n'est pas en raison directe de la vitesse du refroidissement. La loi des variations de l'intensité électrique, qui est très-compliquée, dépend probablement du pouvoir conducteur de la tourmaline, et de la force coercitive des parties constituantes, laquelle force s'oppose à la recomposition immédiate des deux électricités. Il n'y a pas d'autre moyen d'expliquer, en effet, pour quel motif la tourmaline est encore électrique par un refroidissement lent à 15°, tandis qu'elle ne le devient qu'à 50° quand on la chauffe. D'un autre côté, s'il est facile de mesurer l'intensité électrique de la tourmaline pendant son refroidissement, il n'en est pas de même lorsqu'on élève la température, attendu que son état électrique change avec une assez grande rapidité.

Dans le tableau précédent, les nombres de la quatrième colonne donnent l'intensité de la force qui produit les oscillations en considérant la tourmaline suspendue comme un pendule dont le point de suspension serait le milieu de cette pierre, et qui oscillerait de chaque côté du conducteur en relation avec les pôles des piles sèches. Ce mode d'expérimentation montre bien là comment diminue l'intensité de la force électrique par le refroidissement.

Dès l'instant que les effets électriques produits dans la tourmaline par élévation de température sont inverses de ceux que donne l'abaissement de la température, il en résulte que, si les deux extrémités ne se refroidissent pas en même temps, ou bien s'il y a élévation de température d'un côté et abaissement de l'autre, il pourra se faire que l'état électrique de la tourmaline varie de six manières différentes, savoir :

A l'un des pôles.	A l'autre.
(+)	(—)
(+)	(+)
(—)	(—)
(+)	(0) au passage
(—)	(0)
(—)	(+)

Le premier état a lieu lorsque toute la surface de la pierre est exposée également à un refroidissement ou à un échauffement. Il en est de même du dernier. Quant au second et au troisième, ils se

produisent lorsque l'un des pôles seulement est dans un état de refroidissement, tandis que l'autre est dans un état d'échauffement. Relativement au quatrième et au cinquième, ils se présentent toutes les fois que l'un des pôles se trouve dans un état d'échauffement ou de refroidissement, et l'autre dans un état stationnaire.

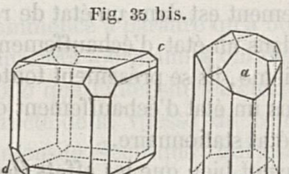
Tous les faits exposés jusqu'ici prouvent bien que les effets électriques de la tourmaline sont le résultat de la dilatation et de la contraction, et que, lorsque la température est stationnaire, il n'y a aucun effet électrique produit. Si nous nous reportons aux effets de clivage, nous trouvons analogie dans les résultats. Dans le cas actuel, la chaleur, à mesure qu'elle est communiquée, dilate les parties, opère une espèce de clivage moléculaire, et doit mettre en liberté, sur les deux faces en regard, les deux électricités. Nous verrons plus loin comment ce dégagement peut produire les effets observés.

Nous ne devons pas omettre de signaler une propriété remarquable de la tourmaline, que l'on a reconnue dès l'instant que l'on a commencé à étudier ses effets électriques. Quand cette pierre est électrisée par échauffement ou par refroidissement, si l'on vient à la briser en un point quelconque, chaque partie séparée manifeste un état électrique opposé, de sorte que chaque moitié possède encore la polarité électrique. Cet effet ne peut avoir lieu qu'autant que les deux électricités, qui deviennent libres dans chaque moitié, étaient dissimulées dans le cristal entier, dans le plan même de section.

Toutes les tourmalines ne sont pas également électriques; quand elles sont trop longues ou trop ferrugineuses, elles ne donnent aucun effet. Les tourmalines brunes de 2 à 4 centimètres de longueur sont celles qui le sont le plus.

La tourmaline n'est pas le seul minéral cristallisé qui jouisse de la propriété électrique par élévation ou abaissement de température. Haüy a reconnu que cette propriété existe encore dans les substances dont les cristaux dérogent à la loi de symétrie, c'est-à-dire dont les parties opposées correspondantes ne sont pas semblables par le nombre, la disposition et la figure de leurs faces, et que le sommet qui est le plus chargé est celui qui manifeste l'électricité positive par refroidissement. Les substances dans lesquelles on a reconnu la faculté électrique par la chaleur sont : la topaze, la boracite, le mésotype, le silicate de zinc, le sphène, l'axinite, la phrénite, etc.

Fig. 35 bis.



ab (fig. 53 bis) représente un cristal de tourmaline et *cd* un cristal de boracite ; on voit que les sommets opposés dans chaque cristal, *a*, *b* et *c*, *d*, sont terminés différemment.

Ce que nous avons dit sur les propriétés électriques de la tourmaline suffit pour avoir une idée des effets électriques produits par la chaleur. Voici comment on conçoit cette production : dans un prisme de tourmaline devenue électrique, la tension de l'électricité libre va en décroissant depuis chaque bout jusqu'au milieu, qui est à l'état 0 ; d'un autre côté, l'expérience nous a appris que le clivage des cristaux constituait chaque partie séparée dans un état électrique différent, d'où l'on en a conclu qu'il en serait encore de même si l'on séparait deux molécules l'une de l'autre, et que la chaleur devait donner lieu à des effets du même genre.

Nous possédons un appareil qui nous présente, grossièrement à la vérité, les effets des substances minérales électriques : c'est la pile électrique, formée d'un certain nombre de plaques de verre armées d'une feuille d'étain sur chacune des deux faces, et disposées parallèlement les unes aux autres, en sorte que la face *b* de la première communique, au moyen d'un fil métallique, à la face en regard *a'* de la seconde ; la face *b'* de celle-ci, à la face *a''* de la troisième, et ainsi de suite jusqu'à la dernière, dont la face b^n communique avec le sol. Lorsque cet appareil est isolé, si l'on fait communiquer la face *a* avec le conducteur d'une forte machine, et qu'après l'avoir électrisée on rompe les communications entre le conducteur et le sol, au bout d'un certain temps les deux faces extrêmes *a* et b^n de cette pile possèdent un excès d'électricité contraire, et chaque moitié de la pile, une électricité également contraire, dont l'intensité va en diminuant jusqu'à la lame du milieu, qui est à l'état neutre.

Voici ce qui se passe : la face *a* possède une charge électrique en partie libre, en partie dissimulée par l'électricité de nature contraire qui est fixée sur la face *b* ; il en est de même de la face *a''* par rapport à la face *b*, et ainsi de suite jusqu'à la dernière. L'excès d'électricité libre décroît rapidement d'un élément à un autre. Si l'appareil était parfaitement isolé, il n'y aurait aucun changement dans son état électrique ; mais comme il se trouve dans un milieu qui enlève à chaque surface une quantité d'électricité proportionnelle à l'excès qui est libre, il s'ensuit que cette perte sera plus

grande pour la face *a* que pour la face *a'*, et ainsi de suite jusqu'à la face *b''* qui n'a pas d'électricité libre. Il résulte de cet état de choses que *a* ayant perdu une portion de son électricité libre, ne pourra plus neutraliser sur *b* la quantité qui s'y trouvait auparavant. Il en est de même à l'égard de *b'*, et de même pour les faces *a''*, *a'''*, jusqu'à la dernière *b''* qui ne se trouvera plus alors avoir son électricité complétement neutralisée, de sorte qu'une portion deviendra libre. Cette portion, d'abord très-petite, augmentera successivement, et perdra également par l'action absorbante de l'air, mais moins que les portions libres des autres lames, puisqu'elle est d'abord très-faible; mais, la perte d'électricité libre diminuant de plus en plus sur la première face et augmentant sur la dernière, et les lames intermédiaires éprouvant des effets semblables, il en résultera que les électricités des faces extrêmes arriveront à l'égalité, et posséderont, par conséquent, deux électricités égales et de signe contraire, lesquelles iront graduellement en décroissant jusqu'au centre où il n'y aura pas d'électricité libre. En rompant la pile en un endroit quelconque, on sépare les deux électricités qui étaient dissimulées, de sorte qu'on n'a sur chaque face séparée qu'une certaine quantité d'électricité libre, de nature contraire à celle de l'extrémité correspondante.

La tourmaline, la topaze, etc., nous présentant des effets absolument semblables, on doit rechercher si la cause indiquée précédemment n'interviendrait pas dans la production de ces effets. La topaze, par exemple, n'a qu'un sens de clivage perpendiculaire à l'axe de cristallisation; si l'on enlève une lame, elle prend un excès d'électricité contraire à celui qu'acquiert la face en regard, et cela quel que soit l'endroit où l'on opère le clivage : c'est donc une disposition semblable à celle de la pile électrique. Cela posé, lorsqu'on élève la température du cristal, on écarte les lames dont l'épaisseur est celle d'une molécule, on doit avoir alors un dégagement d'électricité analogue à celui que l'on obtient dans le clivage; de sorte que, la substance conduisant mal, il peut se former une pile semblable à celle que nous venons de décrire, en admettant que chaque molécule, par l'effet du refroidissement ou l'abaissement de température, possède deux pôles électriques contraires; que l'espace intersticiel remplace la tige métallique, et que le système cristallin soit tel que l'une des faces de chaque lame renferme les pôles de même nom, et la face en regard les pôles d'électricité contraire.

Ce qui tend encore à assimiler la topaze et les cristaux électriques aux piles électriques ou à une réunion de petits condensateurs, ce sont les effets produits quand on brise la pile ou une topaze. Chaque partie séparée manifeste encore une électricité de signe contraire, comme si ces deux électricités étaient dissimulées avant la rupture.

Le même raisonnement s'applique à tous les cristaux autres que la topaze, dans lesquels le clivage n'est pas aussi net que dans celle-ci; car, bien que ce clivage n'existe pas toujours, on conçoit cependant, d'après les idées que nous possédons sur la cristallisation, que la nature ait employé un mode de superposition semblable; seulement, nos moyens mécaniques sont insuffisants pour opérer la séparation de ces lames.

Il est à remarquer toutefois que l'axe électrique ne se confond pas toujours avec l'axe cristallographique. Si la plupart des minéraux pyro-électriques ont leurs pôles aux extrémités du cristal, il y en a cependant qui ont des pôles centraux : c'est pour ce motif que M. G. Rose appelle pôles chaque couple de points opposés possédant une électricité contraire et axe électrique la ligne qui joint ces points; pôle analogue électrique, celui qui est positif par élévation de température, et négatif quand il y a abaissement, et pôle antilogue celui qui manifeste des effets inverses. Dans l'étude des propriétés pyro-électriques de quelques cristaux, il ne faut pas oublier que la plupart du temps ces cristaux sont composés de macles, possédant chacune des pôles, qui compliquent nécessairement leur état électrique.

MM. Riess et G. Rose ont reconnu, comme on le savait déjà, que la tourmaline, le silicate de zinc et la scolézite étaient à pôles terminaux et que leur axe d'électricité se confondait avec leur axe de cristallisation.

Les deux derniers minéraux présentent une circonstance remarquable : la scolézite est composée de cristaux réunis par une de leurs extrémités sous forme de masses radiées; l'extrémité libre, celle qui est divergente, possède le pôle antilogue, tandis que l'autre a le pôle analogue. Dans la calamine, c'est l'inverse.

L'axinite, qui se présente sous la forme de prisme oblique non symétrique, possède deux axes d'électricité, distincts des axes de cristallisation.

La boracite cristallise en cubes qui dérogent à la loi de symétrie; cette condition se lie à l'électricité polaire, puisque les sommets opposés acquièrent une électricité contraire par la chaleur. Elle

a donc quatre axes d'électricité se confondant avec les quatre axes du cristal. Le docteur Hankel a annoncé que cette substance possédait trois autres axes se confondant avec ceux du cube. Cette substance aurait donc des pôles aux centres des faces et aux extrémités des axes. MM. Riess et G. Rose ont constaté l'exactitude du fait; ils ont reconnu encore que la phrénite, qui cristallise en prisme droit rhomboïdal de 100° environ, possède deux axes d'électricité placés bout à bout et se confondant avec la petite diagonale de la base, de telle sorte qu'au centre du cristal il existe un pôle analogue commun, et que les deux pôles antilogues se trouvent aux deux extrémités de cette diagonale. Ce minéral fait donc partie d'une classe de cristaux à pôles centraux, dans laquelle il faut encore comprendre la topaze.

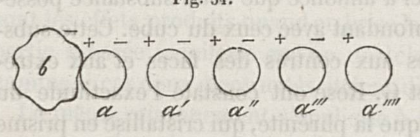
Effets électriques produits par la chaleur dans les circuits formés d'un seul métal. Lorsqu'on fait varier la température des corps conducteurs, il se manifeste également des phénomènes électriques très-remarquables, non-seulement par leur intensité, mais encore par la généralité des circonstances dans lesquelles on les observe. Commençons par les cas les plus simples (Becquerel) :

Fig. 53 ter.

Si l'on introduit un fil de platine *ab* dans un tube de verre fermé à la lampe par l'une de ses extrémités, et que l'on fasse communiquer le bout libre du fil avec le plateau inférieur d'un condensateur platiné ou doré, en touchant du doigt le plateau supérieur, et qu'au moyen d'une lampe à alcool on porte au rouge la partie du tube qui est fermée, on n'obtient aucune charge électrique en séparant les plateaux. Mais si l'on enroule sur l'extrémité du tube qui a été fermée, le bout *a'* d'un fil de platine dont le bout libre *b'* communique avec le sol, et que l'on chauffe jusqu'à l'incandescence la partie enroulée, le fil intérieur transmet au condensateur une charge très-sensible d'électricité positive. Or, les points *a* et *a'* n'ayant pas la même température, et le verre qui les sépare étant devenu conducteur de l'électricité, il faut donc que le bout intérieur *a*, qui est moins chaud que le bout *a'*, prenne l'électricité positive, et *a'* l'électricité négative.

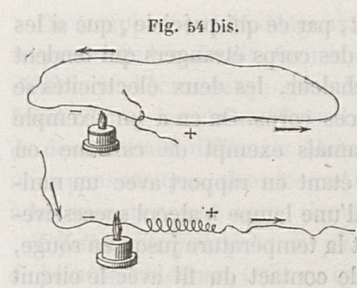
Ce résultat nous conduit à un principe important dont voici l'énoncé : Lorsqu'un fil de métal non oxydable ou une suite de particules a, a', a'', etc., liées entre elles par la force d'agrégation, est mis en contact par l'une de ses extrémités a avec une source de chaleur b, d'une nature quelconque, à l'instant où la chaleur commence à se propager dans le fil, cette extrémité prend l'électricité positive, tandis que l'électricité négative retourne vers la source; mais a' recevant de la chaleur de a par rayonnement, puisque la chaleur se transmet de particule à particule, et a'' de a', ainsi de suite, la seconde particule, qui s'échauffe aux dépens de la première, prend à celle-ci, à chaque instant, de l'électricité positive et lui transmet de l'électricité négative, jusqu'à ce que l'équilibre de température soit rétabli entre elles. D'un autre côté, la décomposition de l'électricité étant immédiatement suivie d'une recomposition des deux électricités dégagées, il en résulte une foule de décompositions et de recompositions électriques, qui ne cessent que lorsque l'équilibre de température est complétement établi dans toutes les parties; d'après cela, il ne peut y avoir d'électricité libre qu'aux deux extrémités. Si donc l'on touche le bout incandescent avec un corps conducteur assez volumineux, tel qu'un morceau de papier humide ou un morceau de bois mouillé, on enlève à ce bout son électricité positive, et il ne reste au fil que l'électricité négative. Cette expérience prouve que pendant le mouvement de la chaleur dans une barre de métal, il s'opère une suite de décompositions et de recompositions d'électricité naturelle qui ont de l'analogie avec le mode de propagation de la chaleur dans les corps.

Fig. 54.



L'expérience suivante vient confirmer cette manière de voir (Becquerel). Soit un circuit formé d'un fil de platine dont les deux extrémités sont en communication avec un multiplicateur à fil court ; si l'on élève la température d'une partie quelconque du fil de platine loin des soudures, l'équilibre des forces électriques ne saurait être troublé en raison de l'homogénéité de toutes lès parties, et de ce que la propagation de la chaleur se fait également à droite et à gauche des points échauffés. Mais il n'en est plus de même quand on forme un nœud ou une spirale, à peu de distance du foyer de chaleur; il se produit alors un courant dont la direction indique que

Fig. 54 bis.



le nœud ou la spirale a pris l'électricité positive. Or, comme il n'y a dans cette partie aucune soudure, il faut en conclure que l'effet électrique est dû à une différence dans la propagation ou le mouvement de la chaleur à droite et à gauche du foyer, par suite de la présence de la spirale ; les fils métalliques bons conducteurs de la chaleur ne donnent aucun effet appréciable.

On obtient des effets analogues à ceux qui viennent d'être exposés, lorsqu'il y a solution de continuité dans un fil de platine. Supposons fixés aux deux extrémités du fil d'un multiplicateur, deux fils de platine parfaitement homogènes, et terminés en spirale ; plongeons une de ces spirales dans la flamme d'une lampe à alcool, retirons-la quand elle est rouge, et posons-la sur celle qui est à la température ordinaire, il y a courant électrique, dont la direction est telle, que le bout qui s'échauffe prend à l'autre l'électricité positive. Avec deux fils de cuivre, parfaitement décapés, on n'obtient un courant qu'autant que l'une des spirales est primitivement oxydée. L'application d'une couche très-mince de mercure, d'étain, d'or ou d'argent pur sur la spirale produit un effet semblable ; il suffit, en un mot, de changer le mode de propagation de la chaleur, pour avoir un dégagement d'électricité. L'or et l'argent présentent les mêmes effets que le cuivre quand ils sont purs ; mais, s'ils renferment du cuivre, la couche d'oxyde qui se forme quand on chauffe suffit pour mettre obstacle à la propagation de la chaleur. Veut-on avoir un courant continu, on prend deux fils de cuivre, en rapport chacun par un bout avec l'une des extrémités du fil d'un multiplicateur, on réunit les deux bouts libres, au moyen de deux crochets passés l'un dans l'autre, et l'on chauffe jusqu'au rouge, à droite ou à gauche des points de jonction, avec une lampe à alcool ; il se produit un courant électrique dirigé du côté chaud au côté froid, aussitôt que la surface de cuivre est recouverte d'une couche d'oxyde. En opérant avec des métaux oxydables, tels que l'antimoine, le zinc et le fer, les effets sont inverses, c'est-à-dire que le courant va du froid au chaud. L'oxydation n'est pas la seule cause de cette inversion, car, s'il en était ainsi, le côté chaud, qui serait le plus attaqué, continuerait à être négatif.

Le plomb et l'étain donnent des effets variables, en raison de

leur hétérogénéité. On a vu, en effet, par ce qui précède, que si les fils ou masses métalliques recèlent des corps étrangers qui tendent à modifier la propagation de la chaleur, les deux électricités se séparent au point où se trouvent ces corps. On en a un exemple dans le fer, qui n'est presque jamais exempt de carbone ou d'oxyde. En effet, si un fil de fer, étant en rapport avec un multiplicateur, on promène la flamme d'une lampe à alcool successivement sur tous les points, en portant la température jusqu'au rouge, et éloignant la flamme des points de contact du fil avec le circuit du multiplicateur pour ne pas les échauffer, on obtient souvent un courant électrique qui ne peut être attribué qu'à l'inégale propagation de la chaleur dans deux portions contiguës; mais, comme toutes les parties ne donnent pas lieu à cet effet, on peut l'attribuer à la présence des corps étrangers ou à la différence d'écrouissage des différentes parties du fil.

Dans les métaux cristallisés comme le bismuth, l'antimoine, on observe des courants électro-électriques dans différents sens, provenant de la manière inégale dont se distribue la chaleur dans la masse : ces effets sont donc beaucoup plus manifestes dans ce cas qu'en faisant usage de fils de cuivre, de fer ou d'argent.

Il résulte des faits précédents qu'en prenant deux fils de platine, de diamètre différent, communiquant par un de leurs bouts avec le multiplicateur, et en contact par leur bout libre terminé en anneau; si l'on plonge l'anneau du fil le plus fin dans la flamme d'une lampe à alcool, on a un courant continu, par suite de l'inégale propagation de la chaleur dans les deux fils. Nous répétons encore que toutes les causes qui tendent à modifier dans les corps la propagation de la chaleur troublent l'équilibre des forces électriques.

On observe également des effets thermo-électriques quand des fils ou des lames de platine sont plongés dans des flammes; mais comme dans cette circonstance il peut également se produire des effets provenant de la combustion, nous n'en parlerons que dans le chapitre suivant.

On doit donc regarder comme démontré que, lorsque la chaleur chemine dans un corps, à l'endroit où elle rencontre un obstacle, il y a séparation des deux électricités. Mais cet obstacle peut provenir non-seulement de la présence de corps étrangers, mais encore de l'état cristallin des corps, en vertu duquel l'élasticité des parties n'étant pas la même dans tous les sens, la propagation de la chaleur ne doit pas être uniforme (Becquerel).

On a supposé, et M. Magnus en particulier, que les effets électriques dans les circuits formés d'un seul métal étaient dus à une différence d'écrouissage dans les deux parties contiguës, ce qui ferait rentrer les phénomènes dans ceux que l'on observe à l'aide de deux métaux différents. Mais si ces effets peuvent se présenter, nous pensons que, dans les cas cités plus haut, les effets sont dus à la cause que nous avons signalée.

Effets électriques produits par la chaleur dans les circuits formés de plusieurs métaux. On a vu que l'on obtient dans un fil de platine un courant électrique continu quand, ayant réuni ensemble les deux bouts libres au moyen de deux anneaux passés l'un dans l'autre, on porte le foyer de chaleur à droite ou à gauche des points de jonction, et qu'il en est encore de même en opérant avec deux fils de cuivre, dont une des surfaces a été préalablement oxydée. Mais si l'expérience se fait avec deux fils de métaux différents, soudés par un de leurs bouts, ou seulement rapprochés par une forte pression, et en communication de l'autre avec les extrémités d'un multiplicateur à fil court, on a des courants électriques pouvant acquérir une certaine intensité et qui permettent de ranger les métaux dans l'ordre suivant :

Bismuth, platine, plomb, étain, cuivre, or, argent, zinc, fer, antimoine (Becquerel).

Dans cette classification, chaque métal est positif par rapport à celui qui le précède, et négatif relativement à ceux qui le suivent; cet ordre est précisément le même que celui que nous avons indiqué pour les effets électriques de frottement (page 132), lesquels n'ont pu être attribués entièrement à la chaleur dégagée; car si, au lieu de frotter légèrement deux lames l'une contre l'autre, on les frappe à coups redoublés en évitant les frottements latéraux, il ne se produit pas de courant électrique.

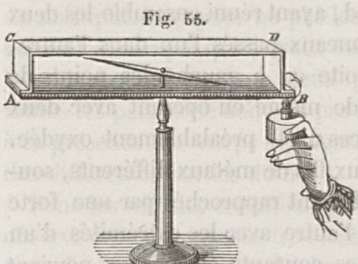
Si l'on interrompt par un liquide un circuit thermo-électrique au moyen de deux lames de platine plongeant dans ce liquide, et en communication avec des lames ou des fils de métal, on n'obtient qu'un faible courant en chauffant la soudure; en effet, le liquide, en raison de sa mauvaise conductibilité, augmentant de beaucoup la résistance totale du circuit, il peut y avoir recomposition des deux électricités à la source même d'où elles émanent, c'est-à-dire au contact des deux métaux.

Diverses substances minérales conductrices, telles que la plombagine, le peroxyde de manganèse, le persulfure de fer, peuvent ser-

vir à former des circuits thermo-électriques à la manière des métaux. La plombagine est positive par rapport au platine, tandis que ce dernier est positif relativement au peroxyde de manganèse et au persulfure de fer.

En se fondant sur les effets que l'on observe avec le bismuth et l'antimoine, qui sont les métaux tenant les extrémités de la série citée plus haut, on peut disposer un petit appareil qui montre simplement la production de l'électricité dans un circuit mixte composé de deux métaux, lorsque l'on chauffe une des surfaces de séparation.

Fig. 55.

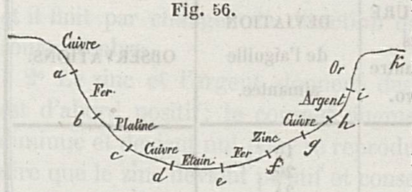


ABCD est un rectangle formé d'une barre en bismuth AB à laquelle sont soudés les trois côtés en antimoine AC, CD, DB. Au centre peut se mouvoir sur un pivot une aiguille aimantée. On place le rectangle de manière que son plan soit le même que le plan vertical passant par l'aiguille aimantée. Alors, avec une lampe à alcool, on échauffe un des points de jonction : soit B. L'aiguille au bout de quelques instants se dévie et indique l'existence d'un courant électrique circulant dans le rectangle. Si on laisse refroidir B et qu'on chauffe A, l'autre soudure, l'aiguille se dévie encore, mais en sens inverse, le courant électrique ayant changé de sens. Cette expérience repose sur le fait fondamental observé par Seebeck, qui a découvert les courants thermo-électriques produits dans les circuits composés de plusieurs métaux.

En cherchant parmi les propriétés calorifiques des corps celles qui ont quelques rapports avec les propriétés thermo-électriques, on ne trouve que la chaleur spécifique, car l'ordre des métaux rangés suivant leur chaleur spécifique est : bismuth, plomb, or, platine, argent, antimoine, zinc, cuivre et fer. Quoique dans les deux tableaux le rang de chaque métal ne soit pas le même, on voit cependant qu'à peu d'exceptions près, les métaux les plus électro-négatifs sont ceux qui ont le moins de chaleur spécifique. La capacité calorifique peut donc influer jusqu'à un certain point sur les phénomènes thermo-électriques. De plus, nous avons vu que le pouvoir conducteur pour l'électricité était aussi une des causes des effets électriques dus à l'action de la chaleur ; voilà donc deux causes qui concourent à l'effet général. Continuons l'examen de ces phénomènes.

On prend un circuit composé de fils de différents métaux et en relation avec un galvanomètre; dans ce circuit le cuivre et le fer sont d'abord en contact immédiat en *a*, fig. 56, et partout ailleurs ils sont séparés aux soudures *b* et *c*, *d* et *e*, *f* et *g*, par des fils de platine, d'or et d'étain. On commence à porter la soudure *a* à 50°, tandis que l'on maintient à zéro toutes les autres; on observe alors l'intensité du courant, puis l'on porte successivement à 50° les soudures *b* et *c*, *d* et *e*, *f* et *g*, en maintenant également toutes les autres à zéro. Dans ces diverses circonstances, les courants produits ont toujours la même intensité, de sorte que le fer et le cuivre, quand ils sont en contact ou séparés par d'autres métaux, donnent naissance à un courant dont l'intensité est la même, et qui ne dépend par conséquent que de la température des deux points extrêmes. Ce fait est très-important, puisqu'il tend à démontrer que le courant ne provient pas d'une action de contact, mais d'une différence dans le mode d'action de la chaleur sur chaque métal en particulier (Becquerel).

Fig. 56.



L'expérience démontre que dans les circuits où les effets thermo-électriques ne sont pas proportionnels aux différences de température, comme dans un circuit fermé, fer et cuivre, si l'on élève chacune des soudures à une température différente, l'intensité du courant est égale à la différence des intensités du courant produit, quand on porte successivement chacune des soudures à l'une de ces températures, l'autre soudure étant à zéro, et non à l'intensité du courant qui résulte de la seule différence de température entre les deux soudures.

Il est aisé de prouver qu'en général, les effets produits sont dus au mouvement de la chaleur, et non à l'oxydation, puisque les mêmes effets ont également lieu dans des milieux privés d'oxygène.

Si l'on opère avec un circuit composé d'un fil de platine et d'un fil de palladium, on trouve que depuis zéro jusqu'à 350° pour chaque accroissement égal de température, l'intensité du courant croît de la même quantité. Dans la plupart des circuits métalliques, l'intensité du courant ne croît guère proportionnellement à la température que jusqu'à 100°.

Il y a des métaux qui présentent des irrégularités remarquables, comme on le voit dans le tableau suivant (Becquerel) :

DÉSIGNATION du circuit.	TEMPÉRATURE d'une des soudures, l'autre étant à zéro.	DÉVIATION de l'aiguille aimantée.	OBSERVATIONS.
	50°	10	
	100	20	
+ —	150	25	
FER-CUIVRE.	200	27,50	Au rouge sombre,
	250	28,50	la déviation change
	300	29	de sens.
	0	0	
	20	2	
	39	4	
	58	6	
	80	8	
	120	10	
	160	8	
	187	6	
	207	4	
+ —	215	2	
ARGENT-ZINC.	225	0	
	236	2	
	247	4	
	253	6	
	262	8	
	270	10	
	281	12	
	300	14	
	290	12	
	282	10	
Avec le zinc et l'or, à 70°, la variation est d'environ 2° ; mais, en continuant à élever la température, elle diminue, et à 150° elle est nulle ; elle recommence alors en sens inverse.			
	150	0	
	180	2	
	195	4	
+ —	219	6	
OR-ZINC.	220	8	
	240	10	
	255	12	
	275	14	

On tire les conséquences suivantes des résultats consignés dans ce tableau :

1° Dans un circuit fer et cuivre, l'une des soudures étant à zéro et l'autre croissant depuis zéro jusqu'à 300°, l'intensité du courant ne croît proportionnellement à la température qu'entre de très-

faibles limites de température ; à 300° le courant thermo-électrique est à peine sensible ; mais, si l'on continue à élever la température, le courant devient stationnaire, son intensité commence à décroître, et il finit par changer de direction quand la température est au rouge sombre.

2° Le zinc et l'argent donnent des effets semblables. L'argent est d'abord positif ; le courant augmente d'intensité jusqu'à 120°, diminue et devient nul pour se reproduire en sens inverse, c'est-à-dire que le zinc devient positif et conserve cet état jusqu'à la fusion ; aussitôt que l'on cesse d'élever la température, le courant diminue et finit par reprendre sa première direction. L'or se comporte de même que l'argent à l'égard du zinc. Quelle est la cause de ce singulier phénomène ? On ne peut l'attribuer qu'à des modifications dans l'état d'agrégation des molécules et à un contact plus ou moins imparfait quand on superpose les deux métaux l'un sur l'autre, et non à l'action de l'air sur le zinc, car l'effet a également lieu quand la soudure plonge dans l'huile privée d'air et d'eau.

3° Le circuit fer et cuivre donne toujours les effets précédemment indiqués, quels que soient le diamètre des fils et leur mode de contact, qu'ils soient soudés ou appliqués avec une forte pression ; mais il n'en est pas de même avec les circuits zinc et or, zinc et argent : les effets varient d'intensité suivant le diamètre des fils et leur mode de contact ; quelquefois même le premier courant est à peine sensible. Les circuits précédents sont les seuls qui aient présenté jusqu'ici de semblables effets.

Pour trouver la relation existant entre les intensités des courants produits par différents circuits, et par conséquent le pouvoir thermo-électrique de chaque métal, c'est-à-dire, la faculté dont jouit chaque métal d'émettre telle quantité d'électricité, dans son contact avec un autre métal, à une température donnée, il faut opérer avec un circuit composé de fils de tous les métaux dont on veut trouver la faculté thermo-électrique d'après une disposition analogue à celle de la figure 58. En ne changeant pas de circuit, la conductibilité est effectivement la même, et les résultats deviennent comparables entre eux. Toutes les soudures sont maintenues à la température zéro, excepté celle sur laquelle on expérimente. Le tableau suivant présente les résultats obtenus avec un circuit composé de fils de huit métaux différents, chacun de deux décimètres de long, d'un demi-millimètre de diamètre, soudés avec

soin bout à bout, et dont les extrémités communiquaient à un multiplicateur à fil court, appareil indispensable dans les recherches relatives aux effets thermo-électriques (Becquerel).

DÉSIGNATION des soudures.	TEMPÉRATURE de la soudure soumise à l'expérience.	DÉVIATION correspondante de l'aiguille aimantée.	INTENSITÉ du courant électrique.
$\overset{+}{\text{Fer}}$, $\overset{-}{\text{étain}}$..............	20	36,50	31,24
$\overset{+}{\text{Cuivre}}$, $\overset{-}{\text{platine}}$..........	20	16,00	8,55
$\overset{+}{\text{Fer}}$, $\overset{-}{\text{cuivre}}$.............	20	34,50	27,96
$\overset{+}{\text{Argent}}$, $\overset{-}{\text{cuivre}}$..........	20	4,00	2
$\overset{+}{\text{Fer}}$, $\overset{-}{\text{argent}}$..............	20	33	26,20
$\overset{+}{\text{Fer}}$, $\overset{-}{\text{platine}}$..............	20	39	36,07
$\overset{+}{\text{Cuivre}}$, $\overset{-}{\text{étain}}$.............	20	7	3,50
$\overset{+}{\text{Zinc}}$, $\overset{-}{\text{cuivre}}$.............	20	2	1,0
$\overset{+}{\text{Argent}}$, $\overset{-}{\text{or}}$...............	20	1	0,50

En comparant les intensités, on trouve que, pour une température de 20°, chaque métal acquiert une puissance thermo-électrique telle que l'intensité du courant produit au contact de deux métaux est égale à la différence des quantités qui représentent chacune de ces puissances dans chaque métal. Ainsi, en désignant cette puissance par p, on aura, pour l'intensité du courant, lorsqu'on élève la température de la soudure fer-cuivre, p fer $-$ p cuivre $= 27,96$; de même, pour le platine et le fer, p fer $-$ p platine $= 36,07$; en retranchant la première expression de la seconde, on a p cuivre $-$ p platine $= 8,11$, au lieu de 8,55 que donne l'expérience. La soudure fer-étain donne 31,24; celle cuivre étain, 3,50 : la différence fer-cuivre est donc 27,74 au lieu de 27,96 donné par l'expérience. Il est bien démontré ainsi que l'intensité d'un courant thermo-électrique est égale à la différence des actions thermo-électriques produites dans chaque métal par la même température : essayons de déterminer chacune de ces actions.

Si l'on représente la puissance ou l'action thermo-électrique du fer à 20° par x, on a :

p fer $= x$
p argent $= x - 26{,}20$
p or $= x - 26{,}70$
p zinc $= x - 26{,}96$
p cuivre $= x - 27{,}96$
p étain $= x - 31{,}24$
p platine $= x - 36$

Pour déterminer x, il faudrait pouvoir mesurer exactement l'intensité du courant produit, quand on opère avec deux fils de fer faisant partie du même circuit et n'ayant pas la même température aux points de contact; mais cette détermination présente de grandes difficultés.

Si l'intensité du courant croissait toujours proportionnellement à la température, les rapports précédents pourraient servir pour toutes les températures; mais il n'en est pas ainsi; cela n'a lieu en général que pour celles qui sont inférieures à 100°.

Dans cet arrangement, chaque métal est négatif par rapport à celui qui le précède. Si x était connu, le pouvoir thermo-électrique s'en déduirait; mais, comme le fer est positif par rapport à tous les métaux qui entrent dans le circuit, on en conclut seulement que sa valeur, dans le cas actuel, est supérieure à 36.

D'un autre côté, l'or, l'argent et le zinc ont des pouvoirs à peu près égaux. Or, quand on cherche parmi les propriétés calorifiques celles qui sont sensiblement les mêmes pour ces différents métaux, on ne voit que les pouvoirs rayonnants qui s'y rapportent. En supposant donc que ces derniers soient proportionnels aux pouvoirs thermo-électriques, ce qui forcerait d'admettre que dans les circuits métalliques il y a au contact un rayonnement semblable à celui qui a lieu dans l'air, et que la différence des pouvoirs rayonnants est aussi une des causes qui influent sur le sens et l'intensité du courant, on parvient alors, mais pour ce cas-là seulement, à déterminer la valeur de x, car on a : $x : x - 26{,}70 :: 15 : 12$, les nombres 15 et 12 représentant le pouvoir rayonnant du fer et de l'or; en tirant de cette proportion la valeur de x et la substituant dans les expressions p argent, p or, etc., on trouve :

p fer.............................. 133,50
p argent.......................... 107,30
p or.............................. 106,80
p zinc............................ 106,54

p cuivre	106,54
p étain	102,54
p platine	97,50

Effets thermo-électriques dans les liquides. Le contact des liquides inégalement chauds peut donner lieu aussi à des courants électriques, comme dans les solides, mais les effets se compliquent de ceux qui ont lieu quand les électrodes ont des températures inégales, puisque, lorsqu'il s'agit de liquides, il est toujours nécessaire d'employer des lames métalliques pour s'emparer de l'électricité.

L'expérience indique qu'une lame chaude est négative par rapport à une lame froide, lorsqu'on plonge l'une et l'autre dans l'eau ou une solution alcaline, ces deux lames communiquant ensemble par l'intermédiaire d'un multiplicateur ; le contraire a lieu dans un acide. Les effets étant les mêmes par le contact d'un liquide froid avec un liquide chaud, on peut en conclure que l'immersion d'une lame chaude de métal dans un liquide échauffe la couche liquide qui entoure cette lame, d'où résulte un courant électrique dû à la réaction de la couche chaude sur le liquide environnant.

Mais dans le mercure ou les amalgames liquides, il paraît qu'il ne se produit pas d'effets de ce genre, car M. Matteucci est arrivé aux résultats suivants : Si l'on plonge les deux bouts libres de deux fils du même métal, en communication avec un galvanomètre et inégalement échauffés, dans un bain de mercure, ou bien si on les tient plongés dans ce même métal ou tout autre bain d'alliage métallique contenu dans deux capsules, réunies par un siphon contenant également du mercure ou de l'alliage, dont l'une est chaude et l'autre froide, le cuivre, le platine, le fer, à l'exception du bismuth, donnent à toute température des courants dirigés du chaud au froid, comme dans les fils qui se touchent. En opérant avec trois capsules remplies de mercure et en communication avec les siphons, afin que les deux capsules extrêmes possèdent la même température, on n'a pas eu de courant.

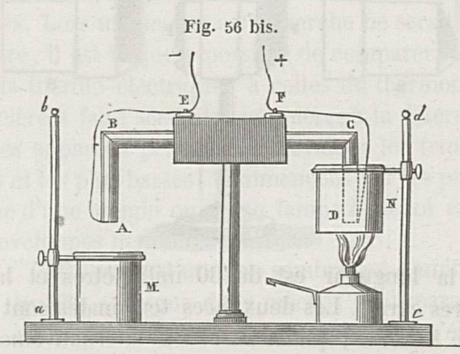
Le fait suivant vient encore à l'appui de cette dernière conclusion. L'amalgame cristallisé de bismuth (5 bismuth, 1 mercure) possède un très-grand pouvoir thermo-électrique, qui se perd à l'état de fusion.

Piles thermo-électriques. On appelle couple thermo-électrique un circuit fermé composé de deux métaux différents dont on a chauffé l'une des soudures, afin de produire un dégagement d'élec-

tricité. En réunissant plusieurs couples semblables, on forme des piles thermo-électriques soumises aux mêmes lois de conductibilité que les piles ordinaires, comme on le verra dans le chapitre IV de ce livre. Quoiqu'on ait varié beaucoup leurs formes, la quantité d'électricité qu'elles donnent étant peu considérable, on ne les a utilisées jusqu'ici que comme sources électriques constantes de peu d'intensité, en maintenant leur température au même degré.

On peut citer la forme suivante, employée par M. Pouillet, et qui donne des résultats satisfaisants :

Fig. 56 bis.



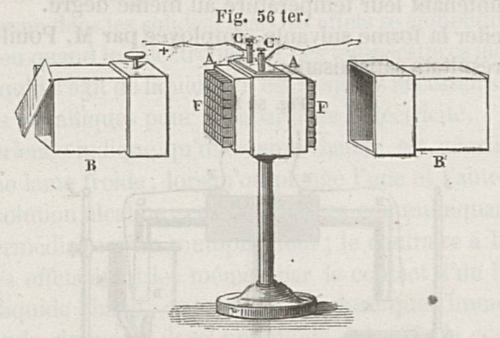
ABCD est une réunion de barreaux de bismuth joints ensemble, auxquels sont soudés en A et D deux gros fils de cuivre AE, DF. Si l'on met les deux bouts E et F en relation avec un multiplicateur, il est évident qu'en chauffant une des soudures A ou D, le couple thermo-électrique cuivre-bismuth donnera un courant dans un sens ou dans un autre. Pour faciliter l'élévation de température, deux vases en cuivre M, N peuvent s'élever ou s'abaisser le long de deux montants en cuivre *ab*, *cd*, de sorte que les soudures A et D peuvent être plongées à volonté dans les vases. On élève alors un des vases N, que l'on remplit d'eau dont on porte la température jusqu'à l'ébullition. On met de la glace dans l'autre vase M, et on plonge l'autre soudure dans celle-ci. Tant que la différence de la température entre les deux soudures est constante, le courant ne varie pas d'intensité.

Les effets d'inversion qui se produisent au delà d'une certaine limite de température, ainsi qu'on peut le voir d'après le tableau de la page 160, montrent que l'on n'a aucun avantage à se servir d'une pile thermo-électrique fer et cuivre dont on porterait la température d'une partie des points de jonction jusqu'au rouge.

Emploi des effets thermo-électriques pour apprécier de très-faibles changements de température. MM. Nobili et Melloni ont construit

en commun une pile thermo-électrique d'un très-grande sensibilité, qui les a mis à même de faire des expériences intéressantes sur la chaleur rayonnante ; mais nous nous bornerons à décrire la pile perfectionnée par M. Melloni, laquelle se compose de cinquante petits barreaux de bismuth et d'antimoine placés parallèlement les uns à côté des autres et formant un seul faisceau prismatique

Fig. 56 ter.



FF', dont la longueur est de 30 millimètres et la section de 96 millimètres carrés. Les deux faces terminales sont noircies ; les barreaux de bismuth, qui se succèdent alternativement avec ceux d'antimoine, sont soudés à leurs extrémités et séparés dans toute leur longueur par une substance isolante. Le premier et le dernier barreau portent chacun un fil de cuivre qui vient aboutir à l'une des chevilles CC', de même métal, passant à travers un morceau d'ivoire fixé sur l'anneau A. L'intervalle compris entre la surface intérieure de cet anneau et les éléments de la pile est rempli de matière isolante. Les extrémités libres de ces deux fils sont mises en communication avec les deux bouts du fil d'un multiplicateur, indiquant par les déviations de l'aiguille si la température de la face antérieure de la pile s'élève ou s'abaisse par rapport à celle de la face postérieure.

Au moyen d'une charnière convenablement placée, l'axe de la pile peut être placé sous différentes inclinaisons. Pour garantir les faces des rayonnements latéraux, on adapte sur les deux côtés de l'anneau les tubes de métal B, B', brillants à l'extérieur et noircis à l'intérieur. C'est avec cet appareil que l'on a pu étudier les différentes circonstances du rayonnement de la chaleur, car le rayonnement provenant de différences de température très-petites entre les corps suffit pour que l'aiguille d'un galvanomètre à fil court en relation avec les deux fils C, C' soit déviée d'un certain nombre de degrés.

Nous n'avons parlé ici de la pile thermo-électrique que comme partie essentielle de l'appareil qui sert à l'étude des différentes branches de la chaleur rayonnante; cette pile est disposée habituellement sur une règle divisée sur laquelle on place des accessoires tels qu'écrans, tablettes, etc..., dont nous n'avons pas à nous occuper ici.

Température des flammes. La marche régulière des effets thermo-électriques, entre certaines limites de température, a permis de les faire servir à la détermination des températures, dans des circonstances surtout où les thermomètres ordinaires ne sauraient être employés. Lors même que cette marche ne serait pas parfaitement régulière, il est toujours possible de comparer les indications des appareils thermo-électriques à celles du thermomètre à mercure de manière à faire servir les premières à la détermination des secondes. Ces appareils permettent d'évaluer les températures les plus élevées et les plus basses; commençons par les premières :

La flamme d'une bougie ou d'une lampe à alcool est composée de quatre enveloppes distinctes, savoir :

Fig. 56 quat.

AC, partie d'un bleu sombre qui s'amincit à mesure qu'elle s'éloigne de la mèche, et disparaît à l'endroit où la partie extérieure de la flamme s'élève verticalement.

AD, espace obscur visible au travers de l'enveloppe brillante, et qui renferme les gaz émanés de la mèche, lesquels ne peuvent brûler parce qu'ils ne sont pas encore en contact avec l'air.

DF, partie brillante de la flamme.

CEF, enveloppe peu lumineuse dont la plus grande épaisseur correspond au sommet de la flamme brillante; c'est dans cette partie supérieure que la combustion s'achève et que la chaleur est le plus intense.

Voici un procédé très-simple à l'aide duquel on mesure la température de ces diverses enveloppes : on prend deux fils de platine de diamètres différents, réunis par un de leurs bouts au moyen de deux crochets passés l'un dans l'autre, et en communication par les deux autres bouts libres avec les extrémités d'un fil du galvanomètre. Ces fils de platine doivent avoir de très-petits diamètres, afin que les points de jonction puissent prendre la température des milieux où ils se trouvent. En élevant successivement la température de ces points depuis zéro jusqu'à 350°, on trouve que l'intensité du courant électrique croît comme la température; par consé-

quent, avec une table construite à cet effet, l'une peut servir à faire connaître l'autre, en admettant toutefois que cette loi continue au delà, comme du reste on peut s'en assurer avec un thermomètre à air, attendu que l'on est toujours très-éloigné du point de fusion du platine, et que les deux fils étant de même métal, on n'a pas à craindre les effets thermo-électriques complexes résultant de la différence des deux métaux (*).

Cela fait, on a posé les points de jonction des deux fils à la partie supérieure de la flamme bleue AC, où l'air encore chargé de tout son oxygène commence à rencontrer la flamme, par conséquent, dans l'endroit où la température est la plus élevée ; on a obtenu, dans une expérience, une déviation de l'aiguille aimantée égale à 22°,50. Quand l'immersion se faisait dans la partie blanche ou dans la flamme proprement dite, la déviation était de 20° ; enfin elle n'était plus que de 17° lorsque les points de jonction se trouvaient dans l'espace obscur autour de la mèche. Or, quand on portait la température des points de jonction à 300°, on avait une déviation de 8°, correspondant à une intensité double du courant produit par une température de 150°. En admettant la loi de continuité, comme on l'a dit, on trouve avec la table que les intensités du courant correspondant aux déviations 22°,50, 20°, 17°, sont dans le rapport des nombres 54, 44, 32, et représentent les températures 1350°, 1080° et 780°; il suit de là que 1350° représenteraient la température la plus élevée que prend un fil de platine de $\frac{1}{3}$ de millimètre de diamètre dans la flamme d'une lampe à alcool de 6 millimètres de diamètre à la partie supérieure de la mèche. On conçoit très-bien que, s'il était possible de négliger la déperdition de chaleur qui s'effectue à la surface des parties du fil contiguës aux portions immergées, les températures trouvées représenteraient avec une assez grande approximation celles des diverses parties de la flamme d'une lampe à alcool; mais comme les résultats ont été les mêmes en opérant avec des fils plus fins que ceux qu'on avait employés, il est permis de croire que le refroidissement indiqué peut être sensiblement négligé.

M. Pouillet a construit un pyromètre magnétique avec lequel il s'est proposé de mesurer les hautes températures.

Ce pyromètre se compose d'un canon de fusil ; du milieu de la culasse du fond part un fil de platine qui est incorporé dans la masse de fer, et qui traverse l'axe du canon pour venir se souder

(*) Becquerel, *Traité d'électricité*, t. IV, p. 3, et t. V, 1re p.

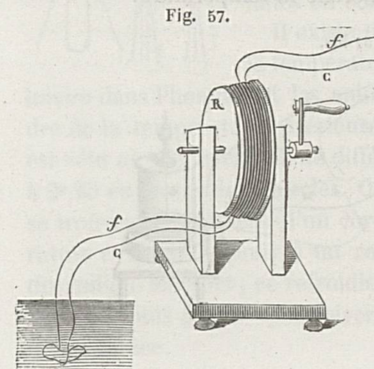
à une pièce de cuivre rouge; de la culasse annulaire part un second fil de platine. Le premier fil de platine est maintenu par un corps mauvais conducteur au milieu de l'ouverture de la culasse annulaire, pour qu'il ne puisse pas la toucher. Une boussole des sinus est mise en relation avec ce couple thermo-électrique fer-platine, au moyen de deux fils de cuivre d'environ un millimètre de diamètre.

L'instrument a été gradué à l'aide d'un pyromètre à air. M. Pouillet a reconnu que l'intensité du courant était loin d'être proportionnelle à la température : la force électro-magnétique moyenne correspondant à chaque degré va en croissant depuis la température ordinaire jusqu'à celle du rouge naissant; elle augmente ensuite pour reprendre à 1000° environ l'intensité qu'elle avait près de zéro, et elle continue ainsi d'augmenter assez rapidement au delà de ce point.

Cette irrégularité dans la marche des effets thermo-électriques dans un couple dont le fer fait partie avait été signalée par l'un de nous dans un premier travail sur les phénomènes thermo-électriques, irrégularité telle qu'à une certaine température les effets thermo-électriques changent de signe (voir page 160); il est préférable de faire usage, pour les hautes températures, de fils de platine de diamètre différent, comme on l'a dit précédemment.

Température à diverses profondeurs dans le sol et dans l'eau. Les courants thermo-électriques peuvent être employés avantageusement aussi à l'étude des variations qu'éprouve la température du sol, de la mer et des lacs, à une certaine profondeur au-dessous de la surface. L'appareil dont l'un de nous a fait usage pour déterminer la température du lac de Genève, se composait d'un fil de cuivre *c* et d'un fil de fer *f*, soudés par un de leurs bouts et en communication par les deux autres avec les deux extrémités du fil formant le circuit d'un multiplicateur très-sensible. Le fil de fer, quand il n'a qu'un millimètre de diamètre, ne doit pas dépasser 160 à 200 mètres de longueur, attendu que le fer est si mauvais conducteur et le courant thermo-électrique si peu intense, qu'on éprouve des difficultés à l'observer quand les différences de températures varient de 1 à 15°. Les deux fils

Fig. 57.

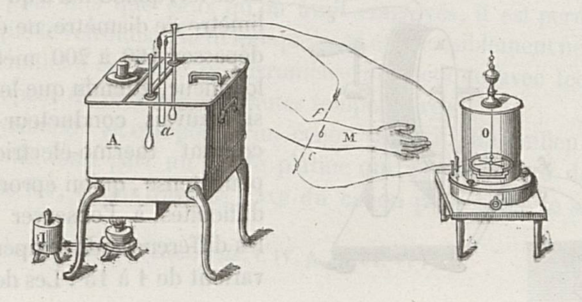


doivent être étamés, recouverts de coton et goudronnés, afin d'éviter la réaction chimique de l'eau. Avec ces précautions, on est assuré que l'appareil n'accuse plus que des courants thermo-électriques.

On les enroule autour d'une roue en bois R, et les deux bouts *c* et *f* sont mis en relation avec un galvanomètre. Lorsqu'on veut opérer, on descend la soudure au fond du lac à l'aide d'un lest, et on observe à chaque instant les déviations du multiplicateur d'où l'on déduit les différences de température de l'eau et de l'air, l'autre soudure ou du moins le point de jonction du fil *f* avec le fil de cuivre du multiplicateur étant placé dans l'air.

Température des parties intérieures de l'homme et des animaux. On explore la température des parties intérieures de l'homme et des animaux, en y introduisant une aiguille ou sonde métallique plus ou moins fine, semblable à celles dont on se sert pour l'acupuncture, car il n'existe aucun autre moyen de traverser impunément les organes sans y produire de lésion. Cette aiguille est composée de manière à obtenir des effets thermo-électriques donnant immédiatement et avec une grande exactitude la température du milieu où se trouvent des points déterminés de la sonde : à cet effet, on prend deux aiguilles composées chacune de deux autres soudées par un de leurs bouts, l'une de cuivre et l'autre d'acier. La communication est établie entre les deux aiguilles, d'une part par leur bout acier avec un fil d'acier de même nature, de l'autre par leur bout cuivre avec les deux extrémités du fil d'un multiplicateur, dont la sensibilité est telle qu'une différence de 0°,10 de température correspond à une déviation de 1°. La soudure de l'une des aiguilles mixtes *a* est placée dans un milieu dont la température est constante A, tandis que la soudure de l'autre *b* est introduite dans la partie dont on cherche la température.

Fig. 57 bis.

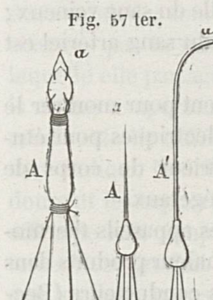


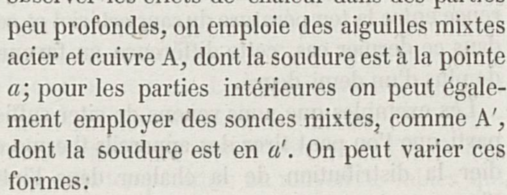
La source de chaleur constante est fournie par l'appareil A de M. Sorel, ou par la bouche d'une personne qui s'est habituée à respirer par le nez, afin de ne pas introduire de l'air froid dans la bouche. Quand la température n'est pas la même aux deux soudures, il en résulte une déviation de l'aiguille aimantée, due à la production d'un courant thermo-électrique. Une table des intensités et des températures correspondantes donne l'intensité du courant, et par suite la différence de température entre les soudures. La température de l'une d'elles étant connue, celle de l'autre ou du milieu exploré s'en déduit immédiatement.

Pour être bien certain de l'exactitude des résultats, on opère d'une manière inverse, c'est-à-dire que l'on place la soudure qui se trouvait dans la bouche, dans la partie dont on cherche la température, et celle de l'autre aiguille dans la bouche. Si les résultats sont les mêmes dans les deux cas, quand les aiguilles sont identiques, on peut considérer les expériences comme bonnes ; dans le cas contraire, on cherche d'où peut provenir la différence, et l'on continue l'expérience jusqu'à ce que l'on soit parvenu à une égalité parfaite.

Lorsque l'on veut observer les effets de chaleur dans des parties peu profondes, on emploie des aiguilles mixtes acier et cuivre A, dont la soudure est à la pointe *a*; pour les parties intérieures on peut également employer des sondes mixtes, comme A′, dont la soudure est en *a*′. On peut varier ces formes.

Fig. 57 ter.





Voici les principaux résultats que l'un de nous a obtenus dans une série d'expériences faites en commun avec M. Breschet :

Il existe une différence bien marquée entre la température des muscles et celle du tissu cellulaire dans l'homme et les animaux, différence qui paraît dépendre de la température extérieure et de la manière dont l'individu est vêtu ou recouvert. Cette différence dans l'homme varie de 1°,25 à 2°,25 en faveur des muscles. On voit par là que les corps vivants se trouvent dans le cas d'un corps inerte dont on a élevé la température et qui est soumis à un refroidissement continuel de la part du milieu ambiant; ce refroidissement se fait sentir d'abord à la surface, puis gagne successivement les couches intérieures jusqu'au centre.

Le mode d'expérimentation que nous décrivons ayant l'avantage de constater des effets de chaleur instantanés a permis de montrer que la température des muscles éprouve des variations par la contraction, le mouvement et la compression. Supposons que l'une des soudures soit maintenue à une température de 36° et que l'autre soit placée dans le muscle biceps brachial, le bras étant tendu : l'aiguille aimantée est déviée de 10° environ. Si l'on ploie alors l'avant-bras de manière à contracter le muscle, la déviation augmente alors de 1 à 2°. On attend que l'oscillation et son retour soient achevés, et à l'instant où elle recommence on ploie de nouveau le bras, afin de donner une nouvelle impulsion à l'aiguille aimantée. On finit ainsi par obtenir une déviation de 15°, correspondant à une déviation définitive de 5°, et par suite à une augmentation d'un demi-degré de température centigrade. Cette expérience prouve bien que les contractions ont la propriété d'élever la température dans les parties où elles se manifestent.

On a prouvé également à l'aide de la méthode thermo-électrique que la compression d'une artère diminue la température des muscles situés au delà du vaisseau adjacent, et qu'il existe une différence entre la température du sang artériel et celle du sang veineux ; dans ce dernier cas, cette différence en faveur du sang artériel est de plus d'un demi-degré.

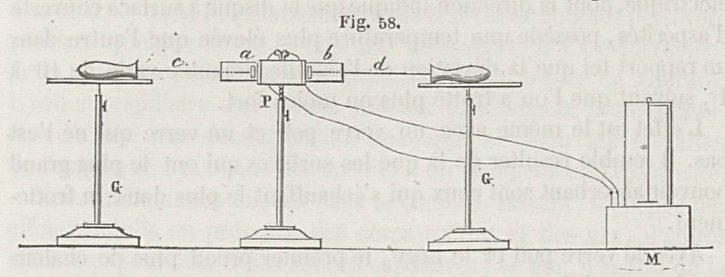
Les exemples que nous venons de citer suffisent pour montrer le parti que l'on peut tirer des appareils thermo-électriques pour étudier la distribution de la chaleur dans l'intérieur du corps de l'homme, de celui des animaux, et même des végétaux.

De la chaleur dégagée dans le frottement. Les appareils thermo-électriques permettent d'analyser les effets de chaleur produits dans le frottement des corps solides bons ou mauvais conducteurs (Becquerel).

Lorsque l'on frotte plus ou moins rapidement deux corps l'un contre l'autre, en maintenant toujours le contact, il y a évidemment transmission de chaleur d'un corps dans l'autre ; la quantité transmise dans chacun d'eux dépend de la conductibilité du corps, de sa capacité pour la chaleur et de l'état de sa surface. La chaleur dégagée sur chaque surface ne peut donc être accusée immédiatement. On peut opérer cependant dans des conditions qui permettent d'avoir une valeur approchée. L'appareil dont on fait usage à cet effet se compose d'une pile thermo-électrique P en relation avec

un multiplicateur M, dont la sensibilité est suffisante pour donner

Fig. 58.



une déviation correspondant à environ un centième de degré centigrade entre les températures des deux faces de la pile. On opère d'abord avec deux corps de même nature *a*,*b*, mauvais conducteurs de la chaleur, ayant la même dimension, taillés en rondelles de 1 à 2 millimètres d'épaisseur, de 1 centimètre environ de diamètre, et ne présentant de différence que dans l'état de leur surface. Ces corps sont fixés avec du mastic à l'extrémité de tiges de verre *c*,*d* : les rondelles ayant été mises au contact par une de leurs faces, on les presse légèrement l'une contre l'autre, et on leur imprime un mouvement uniforme de rotation pendant un temps déterminé. Les deux rondelles sont séparées ensuite rapidement et mises en contact chacune par la surface frottée avec une des faces de la pile, avec laquelle elle partage la chaleur acquise. Les deux rondelles ont-elles la même température, l'aiguille aimantée reste en repos ; la température est-elle différente, l'aiguille est aussitôt déviée, et l'angle d'écart indique la différence de température au moyen de tables qui donnent les rapports entre les déviations et les températures. Les effets ne sont comparables entre eux toutefois qu'autant que le frottement est produit avec une vitesse et une pression constantes, et que les deux corps sont séparés rapidement l'un de l'autre et mis immédiatement en contact avec les faces de la pile, afin de perdre le moins possible de chaleur par le rayonnement.

L'expérience prouve que, quelle que soit la nature des disques frottés, le temps que met l'aiguille pour atteindre son maximum d'écartement, pourvu qu'il ne dépasse pas 60°, est de 10″ ; pour des écartements de 60 à 70°, il est de 9″,5 ; de 9″ pour des déviations de 75 à 90°.

Lorsque l'on frotte rapidement l'un contre l'autre deux disques de liége, dont l'un a une surface lisse et l'autre une surface couverte d'aspérités, et que l'on présente simultanément les deux surfaces

frottées aux deux faces de la pile, on obtient un courant thermo-électrique, dont la direction indique que le disque à surface couverte d'aspérités, possède une température plus élevée que l'autre dans un rapport tel que la déviation de l'aiguille aimantée varie de 10° à 1°, suivant que l'on a frotté plus ou moins fort.

L'effet est le même avec un verre poli et un verre qui ne l'est pas. Il semble résulter de là que les surfaces qui ont le plus grand pouvoir absorbant sont ceux qui s'échauffent le plus dans le frottement.

Avec le verre poli et le liége, le premier prend plus de chaleur que le second dans un rapport tel que chacun d'eux agissant séparément, les déviations de l'aiguille aimantée sont dans le rapport de 36 : 5, correspondant à des intensités de courant égales à 39 et 5 ; il s'ensuit que les quantités de chaleur acquises pendant le frottement et transmises à la pile sont entre elles dans le même rapport.

Avec le verre dépoli et le liége, le rapport des intensités de courant est de 37 : 7.

La comparaison des résultats obtenus en soumettant à l'expérience un certain nombre de corps, montre que jusqu'ici on ne peut tirer aucune loi simple touchant le dégagement de la chaleur dans le frottement, tant sont diverses les causes qui concourent à la production du phénomène ; mais on voit que la nature des corps, abstraction de leur conductibilité exerce une influence que l'état des surfaces ne détruit pas toujours.

Actions capillaires. On observe dans ces actions, des effets électriques qui peuvent être attribués à des réactions chimiques dont l'existence est quelquefois difficile à constater ; il est nécessaire d'en parler afin de préciser les circonstances dans lesquelles ils se présentent (Becquerel).

On met en rapport avec l'un des bouts du fil d'un multiplicateur une cuiller de platine remplie d'acide azotique, dans lequel plonge une éponge en platine en rapport avec l'autre bout de fil. La cuiller et l'éponge doivent avoir été lavées plusieurs fois avec l'acide azotique, qu'on chasse en faisant rougir les deux pièces ; c'est après s'être assuré de la netteté des surfaces que l'on commence l'expérience. Souvent il arrive qu'en plongeant une éponge bien sèche dans l'acide de la cuiller, il y a un fort dégagement d'électricité : L'éponge prend l'électricité négative, comme si elle était attaquée ; immédiatement l'aiguille est chassée dans une autre direction, ce qui annonce que la lame et l'éponge se sont polarisées de manière

à produire un courant en sens inverse. Avec de l'acide azotique étendu il n'y a pas de polarisation, mais le premier courant persévère pendant quelque temps et finit par disparaître. Il y a évidemment là un effet secondaire accusé par cette persévérance de courant. L'action capillaire qui donne lieu au phénomène produit peut-être d'abord une décomposition chimique, ou bien une élévation de température donnant lieu ensuite à un dégagement d'électricité.

Nous indiquerons encore dans le chapitre suivant, à propos des effets produits en présence des corps solides et des gaz, d'autres effets dus peut-être à des actions capillaires, et qui, à raison de la complication des phénomènes, ont été placés après les actions chimiques.

Lorsque la lumière agit sur certaines substances et donne lieu à des réactions chimiques, il en résulte des courants électriques dont il ne sera question que plus loin, attendu qu'il est nécessaire de parler avant des différentes réactions donnant lieu à un dégagement d'électricité.

CHAPITRE III.

Dégagement de l'électricité dans les actions chimiques.

Nous avons indiqué jusqu'ici différentes causes du développement de l'électricité, mais on peut poser en principe que, toutes les fois que les molécules des corps perdent leur position d'équilibre par une cause quelconque, il y a dégagement d'électricité. Nous l'avons prouvé quand elles sont ébranlées, séparées par des actions mécaniques ou soumises à l'action d'agents physiques comme la chaleur; il s'agit de montrer actuellement qu'il en est encore de même quand les éléments des corps se séparent ou se réunissent pour former de nouvelles combinaisons.

Quiconque veut employer l'électricité dans ces applications doit étudier les effets électriques produits dans toutes les actions chimiques, de quelque nature qu'elles soient, et examiner ensuite comment on peut utiliser ces effets pour opérer des combinaisons et des décom-

positions. En chimie on se borne à faire concourir à l'action des affinités, la chaleur et quelquefois la lumière, et l'on ne tient aucun compte de l'électricité dégagée dans de faibles réactions chimiques; on se prive par là d'une puissance énorme dont on peut disposer aujourd'hui pour donner une grande énergie aux affinités. Cette puissance, qui reste silencieuse dans les corps, est demeurée inconnue jusqu'au commencement de ce siècle; mais ce n'est que depuis une vingtaine d'années qu'on est parvenu à démontrer les grands avantages que la chimie et l'industrie peuvent retirer d'une force qui pour l'énergie est supérieure à celle de la vapeur, et dont les applications auront peut-être un jour plus d'importance encore, attendu que les progrès de la civilisation amenant le défrichement des forêts et l'épuisement des houillères, il arrivera une époque où le combustible sera assez rare pour qu'on ne puisse se procurer tous les métaux dont on a besoin. Alors force sera de traiter ceux-ci par voie humide. L'électricité, à cette époque encore très-reculée, sera l'un des plus grands véhicules de l'industrie.

Les effets électriques produits dans les actions chimiques peuvent être observés avec l'électroscope condensateur décrit page 22, ou bien avec le galvanomètre figuré page 76, lequel est construit de manière à être plus ou moins sensible suivant les expériences. Dans le premier cas, on opère avec des vases inattaquables par les agents employés (vases d'or ou de platine) que l'on pose sur le plateau supérieur du condensateur; dans le second, on termine les bouts du fil du multiplicateur par des lames métalliques ou par des vases conducteurs convenablement disposés.

On peut poser en principe général que, dans toutes les réactions chimiques qui s'opèrent entre deux corps, il y a dégagement d'électricité conformément aux lois suivantes:

1° « Dans les combinaisons chimiques, le corps qui s'oxyde, le « métal qui est attaqué, ou le composé qui se comporte comme « base, prend un excès d'électricité négative; le corps comburant, « le liquide qui réagit sur le métal, ou le composé qui se comporte « comme acide, prend le même excès d'électricité positive. »

2° « Dans les décompositions chimiques, les effets électriques sont « inverses de ceux qui se produisent dans les combinaisons; les « bases mettent en liberté de l'électricité positive, et les acides, « dans leur séparation d'avec celles-ci, emportent de l'électricité « négative (Becquerel). »

Il est nécessaire d'entrer dans les détails des expériences relatives

à chaque classe de corps, et aux différentes circonstances qui peuvent se présenter, pour que l'on puisse bien juger des effets produits. Ce sujet, du reste, est trop important pour que nous ne le traitions pas aussi complétement que possible.

Effets électriques produits dans la combustion et dans les flammes. Dans la combustion des corps, l'oxygène prend l'électricité positive; le combustible, l'électricité négative. Mais, pour observer le phénomène, il faut que les corps soient conducteurs; sans cela, la recomposition des électricités aurait lieu au contact, et suivrait immédiatement leur séparation : ainsi, avec le charbon, qui est conducteur, on peut mettre le phénomène en évidence; avec le soufre, qui ne l'est pas, on ne peut y parvenir.

On observe les effets électriques produits dans la combustion du charbon, en plaçant un cône de charbon verticalement à quelques centimètres au-dessous d'une plaque touchant au plateau inférieur d'un condensateur, et en faisant communiquer le charbon avec le sol; lorsqu'on allume ce cône à sa partie supérieure, une colonne de gaz acide carbonique s'élève aussitôt, et transmet au plateau inférieur un excès d'électricité positive. Pour recueillir l'électricité négative du charbon, on le pose par sa base sur le plateau supérieur du condensateur, et on active le feu avec un léger courant d'air, afin d'enlever promptement le gaz chargé d'électricité positive (Pouillet). Mais dans ces conditions, ainsi que l'a fait remarquer M. Matteucci, on n'a d'effets bien marqués que quand l'air est humide.

A priori, on peut dire qu'un corps combustible, conducteur de l'électricité, en brûlant, rend libre de l'électricité négative, et le corps comburant, de l'électricité positive; mais on éprouve des difficultés à mettre ce principe en évidence, attendu qu'on est dans la nécessité d'employer, pour recueillir les électricités dégagées, des lames, des fils ou des spirales en platine, produisant des effets thermo-électriques qui compliquent singulièrement les phénomènes que l'on veut observer.

Ces effets sont tellement complexes que nous croyons devoir les faire connaître avec détails.

Un fil de platine, plongé dans une flamme alimentée par un courant de gaz hydrogène, prend l'électricité positive ou négative, selon que la température est plus ou moins élevée, et la flamme, l'électricité contraire. En mettant celle-ci en communication avec le sol au moyen d'un autre fil de métal, on recueille avec un condensateur l'électricité acquise par le fil de métal en contact avec la flamme.

En mettant en contact un fil de platine avec la flamme d'une lampe à alcool brûlant dans un vase de cuivre en communication avec la terre, le fil prend un excès libre d'électricité négative; ce résultat est inverse de celui qu'on aurait dû trouver si les effets observés étaient dus uniquement à la combustion. On voit par là qu'il faut éviter l'emploi de fils de platine incandescents pour recueillir l'électricité des flammes, à moins de précautions particulières indiquées plus loin.

En faisant usage d'un multiplicateur de vingt-quatre mille tours, d'un couple voltaïque de petite dimension, à courant constant, d'un commutateur destiné à changer la direction du courant, et de deux spirales en platine placées sur un plan horizontal à distance dans la flamme d'une lampe à alcool, l'aiguille aimantée, dans une expérience analogue à celles déjà citées page 95, a été déviée de 9 degrés; la flamme livrait donc passage au courant. En chauffant alors au rouge blanc, à l'aide du chalumeau et d'une autre lampe, celle des spirales qui était en communication avec le pôle positif du couple, l'aiguille du multiplicateur marchait vers 90 degrés; en chauffant l'autre spirale de la même manière, la déviation n'augmentait que de quelques degrés. En premier lieu, abstraction faite du courant du couple, c'est-à-dire le retirant du circuit, la spirale chauffée au rouge-blanc prenait à la flamme de l'électricité positive, d'où résultait un courant thermo-électrique dans un sens contraire à celui du courant du couple. Par conséquent, l'accroissement de l'intensité du courant ne pouvait provenir que d'une propriété thermo-électrique des fils de platine portés à une température élevée et qui n'avait pas encore été remarquée. Cette expérience prouve que la flamme livre passage à un courant thermo-électrique, résultant de l'inégal échauffement des deux spirales, la spirale qui a la température la plus élevée prenant à la flamme, quelle que soit le lieu où on la place, l'électricité positive. Le succès de cette expérience dépend de l'homogénéité parfaite des deux fils de platine dont les spirales sont formées, et de la précaution qu'il faut avoir de porter au rouge-blanc la spirale que l'on chauffe. L'aiguille peut être chassée, dans un multiplicateur de vingt-quatre mille tours, à 90 degrés.

M. Grove, pour étudier l'électricité des flammes, se sert d'une lampe d'émailleur alimentée par l'alcool ou le naphte, et de deux fils de platine enroulés en hélices à l'une de leurs extrémités; ces fils sont en communication avec un multiplicateur très-sensible.

Le dard de la flamme étant formé, l'une des hélices est placée dans la flamme jaune, au delà du sommet du cône bleu, et l'autre à la naissance de la flamme, juste au-dessus de la base du cône bleu; la distance entre les deux hélices, dans une expérience, était de $6^{mill.}$,5. L'hélice placée au milieu de la flamme devint incandescente à la température blanche, tandis que celle qui fut mise à la base de flamme était à la température rouge-cerise; la déviation fut de 6 degrés, dans un sens tel que l'hélice inférieure était positive. En renversant la position des hélices, la déviation avait lieu dans une position inverse.

M. Grove n'attribue pas ce dégagement d'électricité à un effet thermo-électrique, c'est-à-dire à un échauffement inégal des deux hélices, attendu, suivant lui, que la direction du courant ne change pas lorsque l'hélice supérieure est éloignée du centre de la flamme, de manière à s'échauffer moins que l'autre.

En avançant l'hélice inférieure vers celle qui était au-dessus, la déviation diminuait sans changer de direction; mais, quand les deux hélices étaient très-près, la direction du courant dépendait de la température relative des deux hélices. En substituant à l'hélice inférieure un fil de zinc, la déviation était un peu moindre. Quand la position des fils était renversée, le courant était plus fort; il en était de même avec le fer et le cuivre.

Le courant de la flamme paraissant différent du courant thermo-électrique, M. Grove a pensé qu'en les réunissant de manière à les diriger dans le même sens, il obtiendrait des effets plus marqués. A cet effet, il a substitué à l'hélice supérieure un petit cône de platine fixé à un fil de même métal, et il a fait tomber peu à peu dans ce cône, avec une pipette, de l'eau qui, en se vaporisant, le maintenait à une température inférieure au rouge; la déviation fut alors de 20 degrés dans le même sens.

M. Grove conclut de ses expériences qu'il existe dans la flamme, quand on y plonge deux spirales de la manière indiquée précédemment, un courant voltaïque d'une intensité assez forte, et dont l'origine n'est pas thermo-électrique. Ce résultat a de l'analogie avec celui annoncé par M. Pouillet, savoir que l'intérieur de la flamme est négatif, et l'extérieur positif.

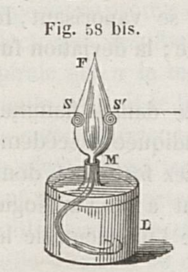
Les expériences suivantes ne permettent pas d'en tirer cette conséquence (Becquerel) :

On prend une lampe à alcool, composée d'un flacon à col rempli d'alcool, dans lequel plonge une spirale de platine en communica-

tion avec l'un des bouts d'un multiplicateur et une mèche de coton passée dans un tube de verre assujetti au col au moyen d'un bouchon. On allume la lampe, et l'on touche la portion de la mèche en contact avec la flamme avec une spirale en fil de platine, en communication avec l'autre bout du fil du multiplicateur; on a encore, comme ci-dessus, un courant dirigé de la spirale échauffée par la flamme à celle qui se trouve dans l'alcool: la déviation est de 10 degrés. La flamme étant conductrice de l'électricité, l'on place la seconde spirale, celle qui était en contact avec la mèche, ainsi que le fil de platine auquel elle tient, dans toute la longueur de la flamme, de manière à traverser toutes les enveloppes dont elle se compose, et à porter sa température au rouge clair: les effets électriques sont encore les mêmes, quant à la direction et à l'intensité; ils n'éprouvent non plus aucun changement en employant le dard du chalumeau. Ce courant a bien dans ce cas une origine thermique, car la spirale et le fil traversent toutes les enveloppes qui sont signalées comme ne possédant pas le même état électrique. Pour bien mettre en évidence cette origine calorifique, on entoure de glace la lampe, afin d'amener à zéro la température de la spirale plongeant dans l'alcool, et l'on substitue à l'autre spirale un vase cylindrique de platine, assez petit pour être immergé dans la flamme, et on le remplit de glace. Tant que celle-ci n'est pas fondue, aucun effet électrique n'est produit; mais, aussitôt qu'elle est fondue, l'aiguille aimantée, par sa déviation, annonce que le vase en s'échauffant est devenu négatif, de même que la spirale plongée dans la flamme; le courant est donc thermo-électrique.

Cela posé, voyons ce qui se passe quand les deux spirales sont placées symétriquement dans la même section horizontale d'une flamme alcoolique, de manière à atteindre la température rouge: l'aiguille aimantée du multiplicateur n'est pas dévié; mais si l'on vient à chauffer jusqu'au blanc éclatant l'une des spirales avec une seconde lampe et le chalumeau, il se produit un courant électrique qui va de la spirale rouge-cerise à la spirale chauffée au rouge-blanc. Le courant est donc dans une direction inverse de celle du courant qui a lieu quand l'une des spirales, se trouvant dans l'alcool, est à la température ordinaire, tandis que l'autre, qui est dans la flamme, possède une température variant depuis quelques centaines de degrés jusqu'à l'incandescence.

Fig. 58 bis.



Les propriétés thermo-électriques du platine changent donc à des températures élevées. Ce fait doit être pris en considération dans l'étude des effets électriques produits dans la combustion.

Voici encore un fait qui vient à l'appui de ce changement : lorsque les deux spirales occupent une même section horizontale de la flamme, et que leur température est portée au rouge clair, si l'on refroidit l'une d'elles avec un tube de verre posé dessus, cette spirale devient positive, de négative qu'elle était, quand on porte l'autre spirale au rouge-blanc avec le chalumeau dans les expériences précédentes ; si, lorsque la spirale est refroidie, on porte l'autre au rouge incandescent, celle-ci est encore négative.

On voit par là que, tant que la spirale chauffée ne dépasse pas le rouge un peu clair, et que l'autre a une température bien inférieure, elle prend l'électricité négative ; mais, quand elle prend le rouge-blanc, et que l'autre est rouge, elle devient positive. Cette inversion peut induire en erreur dans l'analyse des effets électriques produits dans la combustion.

Fig. 58 ter.

Soient L la lampe à alcool ; F la flamme ; S et S′ les deux spirales.

La spirale S, au moyen d'une branche horizontale glissant le long de la tige T′, à l'aide d'une roue dentée et d'une crémaillère, peut monter et descendre.

La spirale S′, pouvant se mouvoir de même, est placée à l'extrémité de la dernière enveloppe visible de la flamme.

Quand la spirale S est mise dans la flamme bleue, en contact avec la mèche, où elle ne prend pas la température rouge, et à une distance de 3 centimètres de l'autre, il se produit un courant allant de S à S′, qui fait dévier l'aiguille aimantée du galvanomètre de 5 degrés ; en l'élevant successivement jusqu'à quelques millimètres de distance de la spirale supérieure, la déviation augmente jusqu'à 20, 30 degrés, et même au delà, selon la position relative des spirales dans la flamme ; aussitôt que les spirales sont en contact, l'aiguille revient à zéro. Le sens du courant est conforme aux effets électriques indiqués précédemment.

Si l'on chauffe avec une seconde lampe et un chalumeau la spirale S′, la déviation augmente. Vient-on, au contraire, à la refroidir

en posant dessus un tube de verre, l'aiguille rétrograde, revient à zéro, puis se dévie de nouveau, dans le même sens, quand le tube s'est échauffé, sans que la spirale redevienne rouge. Ce ne sont là que des effets thermo-électriques. Analysons ce qui se passe dans cette expérience : il est prouvé que lorsque les deux spirales, étant placées dans la même section horizontale d'une flamme, sont à la température rouge, si l'on élève la température de l'une d'elles au rouge-blanc ou au rouge éclatant avec le dard du chalumeau, cette spirale devient positive; n'est-il pas permis de croire que cette même cause a produit aussi le dégagement de l'électricité, dans l'expérience où les deux spirales ont été plongées, l'une dans l'enveloppe bleue et l'autre au-dessus de l'enveloppe blanche? Ce qui tend à appuyer cette conjecture, c'est qu'en chauffant la spirale supérieure, on augmente son état positif.

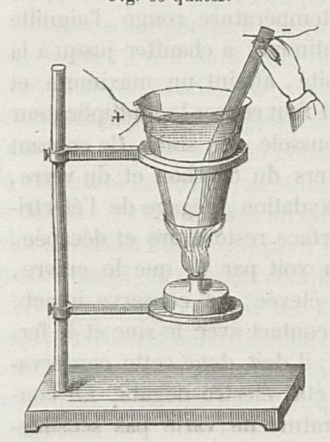
D'un autre côté, en refroidissant la spirale supérieure avec un tube de verre, l'aiguille revenant à zéro pour se dévier de nouveau dans la même direction quand le tube s'est échauffé sans que la spirale redevienne rouge, ne peut-on pas admettre, pour expliquer cet état de choses, d'après les propriétés thermo-électriques du platine précédemment indiquées, que la spirale incandescente, qui était positive, est redevenue momentanément négative quand la température de l'autre est devenue supérieure, et qu'en s'échauffant ensuite en même temps que le tube de verre en contact, elle s'est trouvée dans la même condition que la spirale inférieure à l'égard de la spirale supérieure incandescente?

Les expériences précédentes montrent la difficulté qu'on éprouve à démontrer que les diverses enveloppes de la flamme ne possédent pas un état électrique différent, en même temps qu'elles mettent en évidence les propriétés thermo-électriques du platine qui changent avec la température. Veut-on avoir cependant les effets électriques produits dans la combustion en se mettant à l'abri des effets thermo-électriques, il faut opérer comme il suit :

On prend un morceau de charbon bien recuit, pour qu'il soit conducteur de l'électricité; après l'avoir attaché par un de ses bouts avec un fil de platine que l'on met en communication avec un multiplicateur, on pose le morceau de charbon sur un support, de manière que le bout le plus éloigné des points de jonction avec le fil de platine soit en contact avec la flamme d'une lampe à alcool et puisse brûler; si on prend ensuite une spirale de platine en communication avec le multiplicateur, et qu'on la plonge dans une

des enveloppes quelconque de la flamme, dans tous les cas le charbon prend l'électricité négative. Le dégagement de l'électricité est d'autant plus considérable que la combustion est plus vive, résultat que l'on obtient en l'activant avec le chalumeau. Le charbon prend donc bien, dans cette circonstance, l'électricité négative résultant de sa combustion, tandis que la flamme emporte avec elle le gaz acide carbonique et l'électricité positive. On évite les effets thermo-électriques qui pourraient être produits aux points de jonction des fils en entourant ces points de glace, afin de les maintenir à une température constante. En remplaçant la spirale par un cylindre de plombagine, afin d'éviter tout contact métallique avec la flamme, les effets sont encore les mêmes.

Fig. 58 quater.



Nous terminerons la description des effets électriques dus à la combustion en rapportant l'expérience suivante, qu'il est facile de répéter : Si l'on fixe à l'une des extrémités du fil d'un multiplicateur un creuset de platine rempli de nitrate ou de chlorate de potasse fondu, et que l'on attache à l'autre extrémité un morceau de charbon de cornue dont le bout a été préalablement porté à la température rouge, en plongeant ce charbon incandescent dans le bain en fusion, on a un courant électrique énergique dans un sens tel que le charbon est négatif et le nitrate de potasse positif. Cet effet est dû à la combustion vive du charbon aux dépens de l'oxygène de bain en fusion. Pour que l'expérience réussisse, il est nécessaire de maintenir, avec la main le morceau de charbon afin, qu'il ne touche pas aux parois du creuset.

Courants pyro-électriques. Il est possible de provoquer la puissance électrique en combinant l'action de la chaleur à un haut degré avec celle des affinités. On arrive ainsi à produire des courants nommés *courants pyro-électriques*, par analogie avec les courants obtenus dans les piles ordinaires, et pour les distinguer des courants thermo-électriques, qui sont dus uniquement à la chaleur (Becquerel).

Ces courants, qui sont à force constante tant que la température ne varie pas très-sensiblement, sont produits toutes les fois que des

substances métalliques ou autres, conductrices de l'électricité et solides, sont en contact avec le verre ou toute autre substance vitreuse à l'état de fusion ignée, ou ramollie par la chaleur; mais le maximum d'effet n'a lieu que lorsque la substance est fondue.

Si, dans un fourneau rempli de charbons allumés, on place une tige de fer doux et une tige de cuivre, en relation chacune avec les bouts du fil d'un multiplicateur ordinaire, au moyen d'un fil de cuivre et d'un fil de fer, l'aiguille aimantée n'est pas déviée, quelle que soit la température; il ne se dégage donc pas d'électricité. Mais il n'en est plus de même si l'on introduit la tige de cuivre dans un tube de verre peu fusible, et dont on porte la température jusqu'au point de fusion. Si l'on place dans le circuit un multiplicateur et une boussole des sinus, on reconnaît que, bien avant que le verre ait atteint la température rouge, l'aiguille du multiplicateur est déviée; en continuant à chauffer jusqu'à la fusion, le courant augmente d'intensité, atteint un maximum et reste constant. Bien avant ce terme, il faut retirer le multiplicateur pour ne plus faire usage que de la boussole des sinus. Ce courant est dirigé du fer au cuivre, au travers du charbon et du verre, c'est-à-dire que le fer, pendant son oxydation, dégage de l'électricité négative, et le cuivre, dont la surface reste claire et décapée, rend libre de l'électricité positive. On voit par là que le cuivre, quoique exposé à une température élevée, se conserve intact, comme cela a lieu lorsque, étant en contact avec le zinc et le fer, il est plongé dans un liquide oxydant; il doit donc cette conservation à une température élevée, à son état électro-négatif. Le courant reste constant tant que la température ne varie pas sensiblement et que le fer ne se recouvre pas d'une couche épaisse d'oxyde; Mais, lorsqu'il arrive que le tube fond partiellement et que le cuivre touche le fer, alors tous les signes d'électricité disparaissent. Ce fait prouve que le courant n'est pas thermo-électrique.

Le dégagement d'électricité, dans cette circonstance, a donc bien une origine calorifique et chimique. Pendant que le fer s'oxyde, ce métal prend l'électricité négative, tandis que l'air ambiant s'empare de l'électricité positive, qui est transmise au cuivre par l'intermédiaire des charbons chauffés au rouge et du verre incandescent avec lesquels les gaz sont en contact.

En cherchant le rapport approché qui existe entre le courant produit par le couple pyro-électrique et le courant qui provient d'un couple Bunsen, dont il sera question plus loin, à conductibilité

égale, et abstraction faite de la perte au passage quand il y a inversion dans la direction des courants, on a trouvé que le courant pyro-électrique avait quatre fois moins d'intensité que celui du couple à acide azotique.

On a dit qu'il fallait éviter de chauffer jusqu'à complète fusion du verre, attendu que, le verre et le cuivre ne tardant pas à se toucher, tous les signes d'électricité disparaissaient peu à peu; mais il y a encore une autre cause qui diminue l'intensité du courant, c'est l'oxydation des points de jonction de fils métalliques et des tiges de fer et de cuivre, quand ils sont très-près du foyer de chaleur; on évite cet inconvénient grave en opérant avec des tiges très-longues qui permettent d'éloigner du fourneau les points de jonction.

On devait prévoir que l'on pouvait remplacer l'oxydation du fer à une haute température par la combustion du charbon à la même température; il a suffi pour cela de substituer à la tige de fer un cylindre de charbon de cornue ou de coke préparé à la manière des conducteurs électriques, de le mettre en rapport, au moyen d'un fil de platine, avec la boussole des sinus, et de chauffer l'autre extrémité au rouge, près du tube de verre qui renferme la tige de cuivre: il s'est produit un courant dirigé dans le même sens que celui qui avait été fourni par l'oxydation du fer. On a donc bien, dans ce cas-ci, le courant résultant de la combustion du charbon.

En comparant, comme on l'a fait pour le fer, le courant du couple charbon et cuivre à celui du couple à acide nitrique, on arrive au résultat que le courant du couple à acide nitrique est approximativement 3,76 fois plus fort que le courant pyro-électrique fer et charbon.

Les courants pyro-électriques produisent des décompositions chimiques comme les autres courants; mais on ne peut les obtenir qu'en disposant autrement les appareils : nous indiquerons les trois dispositions suivantes :

1° On place, dans un fourneau à réverbère ordinaire, un creuset de terre revêtu intérieurement d'une lame épaisse de cuivre, contournée de manière à prendre la forme du creuset, et munie d'un fil de même métal passé dans un tube de terre, pour le préserver de l'oxydation. Le creuset est rempli de verre pilé, en quantité suffisante pour recouvrir de 2 centimètres, quand il est fondu, la lame de cuivre. En contact avec le verre, est posé verticalement par l'un de ses bouts un barreau de fer suffisamment long pour dépasser le haut du fourneau; à l'autre bout est assujetti un fil de même métal,

qui sert à le maintenir dans la position qu'on lui a donnée, et à mettre en communication le couple, conjointement avec le fil de cuivre, avec la boussole des sinus ou tout autre appareil.

2° Après avoir rempli un creuset de verre pilé, auquel on a ajouté 0,25 de carbonate de soude pour hâter la fusion, on introduit dedans deux longues tiges de fer et de cuivre, en évitant le contact, et ces tiges sont maintenues dans une position verticale au moyen de fil de fer et de cuivre adaptés aux bouts libres et servant de conducteurs, lesquels fils sont assujettis à des points fixes extérieurs. Aussitôt que le verre est fondu, l'oxyde de fer formé se dissout, et la surface de la tige de même métal reste toujours décapée; aussi le courant produit est-il constant. Il faut avoir l'attention de ne pas chauffer jusqu'à la fusion du cuivre.

3° On prend un canon de pistolet, dans lequel on introduit un tube de verre vert renfermant un cylindre de cuivre ; après avoir rempli tous les interstices du canon et du tube avec du verre pilé, on place le tout horizontalement dans un fourneau disposé à cet effet ; le canon de pistolet et le cylindre de cuivre sont mis en communication avec les appareils par l'intermédiaire de fils de même métal. Cette disposition a donné de très-bons résultats.

Dans les couples pyro-électriques décrits précédemment, on a fait usage du cuivre comme élément électro-négatif; mais on peut employer encore le platine et le charbon des cornues : l'un et l'autre présentent cependant des inconvénients. Le platine est attaqué par le verre et se désagrége; le charbon se brûle très-lentement à la vérité, et produit un courant en sens inverse qui diminue l'action du courant résultant de l'oxydation du fer. Il est possible de parer à cet inconvénient en introduisant un cylindre de charbon dans un tube de terre et fermant les issues avec de la terre pour empêcher la circulation de l'air.

Le verre n'est pas la seule substance vitreuse que l'on puisse employer; parmi celles qui ont été essayées, on citera notamment le borax; mais on y a renoncé, parce qu'il attaque trop vivement les éléments du couple. Quant au sel marin et au nitrate de potasse, on y a renoncé également, les effets étant trop faibles, si ce n'est en employant le dernier sel et le charbon, couple qui donne, ainsi qu'on l'a vu plus haut, un dégagement d'électricité très-fort à l'instant de la déflagration du charbon. Ce couple, à raison de son effet rapide et du danger qu'il présente, ne peut être d'aucun usage.

Le sable et le quartz pur, quelle que soit la température à laquelle

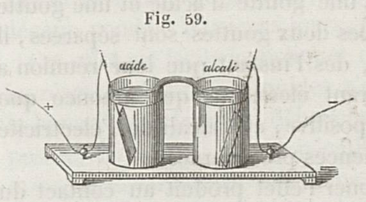
on les expose, n'acquièrent pas la propriété conductrice et ne sauraient remplacer le verre ou les silicates alcalins.

Les faits observés montrent que l'on peut trouver dans la chaleur perdue des usines un moyen de faire fonctionner des couples pyro-électriques produisant des courants électriques constants. Ils rendent probable aussi l'existence de courants électriques, terrestres, au contact ou dans le voisinage de la partie solide et de la partie en fusion du globe, là où il se trouve des substances solides, conductrices, empâtées partiellement dans des silicates fondus, à la manière des couples pyro-électriques (Becquerel).

Réaction des acides et des alcalis entre eux. Dans la réaction des acides et des alcalis, les effets électriques produits sont très-énergiques, et mettent bien en évidence le principe général indiqué plus haut, savoir, que les acides prennent un excès d'électricité positive; les alcalis, un excès d'électricité négative (Becquerel).

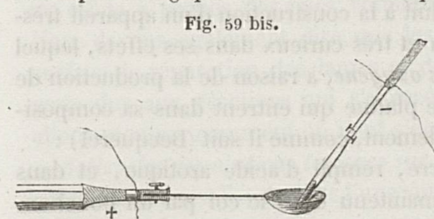
On peut opérer de plusieurs manières. On prend deux capsules en porcelaine, ou deux vases disposés comme le représente la figure 59. On verse dans l'un de l'acide azotique; dans l'autre une solution aqueuse de potasse ou de soude caustique. Dans chacun des liquides plonge une lame de platine en communication avec l'un des bouts d'un multiplicateur qui n'a pas besoin d'être très-sensible. Vient-on à établir la communication entre l'acide et l'alcali en plongeant dans chaque vase le bout d'une mèche de coton ou d'asbeste humectée préalablement d'eau salée ou acidulée, il y a aussitôt réaction de l'acide sur l'alcali, et par suite production d'un courant électrique énergique dans le sens indiqué plus haut.

Fig. 59.



On peut également opérer de la manière suivante: On prend une cuiller de platine et une pince de même métal, et l'on met chacun d'eux en communication avec un des bouts du multiplicateur; on remplit la cuiller d'acide azotique, et l'on fixe entre les branches de la pince un morceau de potasse: à l'instant

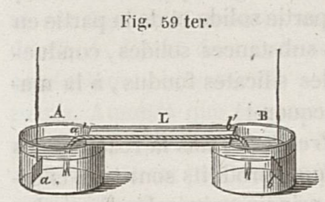
Fig. 59 bis.



où l'on plonge ce dernier dans l'acide, on a un courant très-énergique dirigé comme il a été dit précédemment.

Mais cette méthode d'expérimentation, ainsi que la précédente, donne lieu à une objection de la part des personnes qui admettent des effets électriques de contact en dehors des réactions chimiques. Pour éviter ces objections, on opère comme il suit : on prend deux capsules en platine ou en verre A, B, remplies d'acide azotique, et mises en communication avec un multiplicateur à l'aide de deux lames de platine *a*, *b*; on place les deux capsules à un décimètre de distance l'une de l'autre, et on les fait communiquer au moyen d'une mèche de coton *a'b'* imbibée d'eau et soutenue convenablement au milieu; cette mèche, à raison de sa longueur et du même poids spécifique des deux liquides, s'oppose longtemps à leur réunion; vers le milieu L, on pose doucement avec un tube, à côté l'une de l'autre, une goutte d'acide et une goutte de la solution alcaline. Tant que les deux gouttes sont séparées, il n'y a aucun effet produit; mais, dès l'instant que leur réunion a lieu, il y a production d'un courant électrique qui annonce que l'acide a dégagé de l'électricité positive, et l'alcali de l'électricité négative, comme dans les expériences précédentes.

Fig. 59 ter.



Dans ce cas, on ne peut attribuer l'effet produit au contact du platine, d'une part avec l'acide, de l'autre avec l'alcali, puisque le platine est en contact de chaque côté avec de l'acide azotique.

En substituant d'autres acides à l'acide azotique, les résultats sont les mêmes, mais plus ou moins forts, suivant l'énergie de l'action chimique et la conductibilité des liquides.

Pile à gaz oxygène. L'effet produit dans la réaction de l'acide azotique sur la potasse conduit à la construction d'un appareil très-simple dans sa construction et très-curieux dans ses effets, lequel a reçu le nom de *pile à gaz oxygène,* à raison de la production de ce gaz sur une des lames de platine qui entrent dans sa composition. On le forme très-simplement, comme il suit (Becquerel) :

CD est un flacon en verre, rempli d'acide azotique, et dans lequel plonge un tube AB maintenu dans le col par un bouchon. Ce tube est fermé en B à l'aide d'un morceau de linge, puis d'une certaine quantité d'argile ou de kaolin gâché en pâte épaisse,

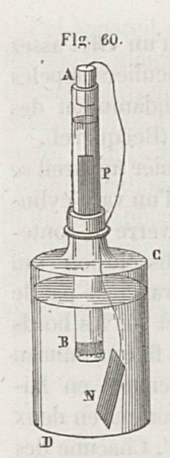


Fig. 60.

de façon à occuper une épaisseur d'environ 1 centimètre ; un peu de coton humide, que l'on introduit dans le tube par l'extrémité A, empêche le mélange de l'argile avec le liquide que doit contenir AB. Dans ce tube on met une dissolution aqueuse de potasse. L'acide azotique du flacon et la dissolution de potasse du tube sont donc en présence par l'intermédiaire de l'argile humide, comme elles l'étaient au moyen du coton dans les expériences précédentes ; en plongeant alors deux lames de platine N et P, l'une dans le flacon, l'autre dans le tube, si ces lames sont en relation avec un multiplicateur, il en résulte un courant électrique énergique dans un sens tel que l'acide prend l'électricité positive, et l'alcali la négative. Mais ce n'est pas tout : si on réunit les deux lames P et N à l'aide d'un simple fil métallique, aussitôt on voit une multitude de petites bulles de gaz se produire autour de P dans la potasse ; ce gaz est du gaz oxygène pur. Il se dégage pendant plusieurs jours, tant que ce couple fonctionne.

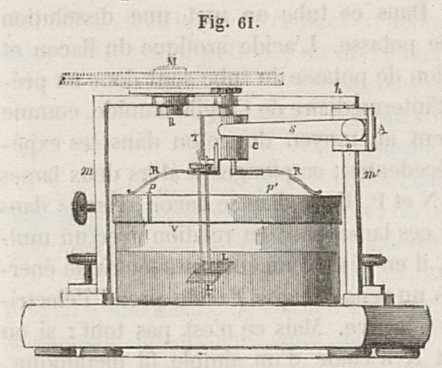
Cet effet est facile à expliquer : La circulation d'électricité due à la réaction des deux liquides s'établit dans le couple lui-même ; la lame P, par laquelle débouche l'électricité positive, est le pôle positif ; la lame N, le pôle négatif. Or l'eau de la dissolution de potasse est décomposée, l'oxygène se dégage sur la lame, et l'hydrogène est transporté dans l'acide azotique. L'acide azotique absorbe l'hydrogène naissant, se colore peu à peu en verdâtre, par suite de la présence des vapeurs nitreuses.

Ce couple est le premier couple à courant constant qui ait été construit, et fonctionne par l'action seule des dissolutions. En joignant plusieurs couples, on forme une pile. Nous reviendrons sur ses effets à propos des piles voltaïques, dans le chapitre suivant. Nous devons également dire que les effets qui se produisent à la surface de séparation des lames et des liquides peuvent masquer ceux dus aux réactions qui s'exercent entre deux liquides ; nous allons montrer comment on peut s'en garantir.

Action des dissolutions les unes sur les autres. Lorsqu'on étudie la réaction de deux dissolutions l'une sur l'autre, les lames métalliques qui servent à transmettre le courant peuvent se couvrir de gaz, de substances diverses, et donner lieu à des réactions inverses qui viennent masquer l'effet qu'on veut étudier. Quelquefois même, quand

l'action devient très-énergique, on n'observe plus qu'un effet assez faible. On peut cependant, à l'aide d'appareils particuliers appelés *dépolarisateurs*, observer les effets produits indépendamment des réactions opérées au contact des lames métalliques (Becquerel).

Fig. 61.



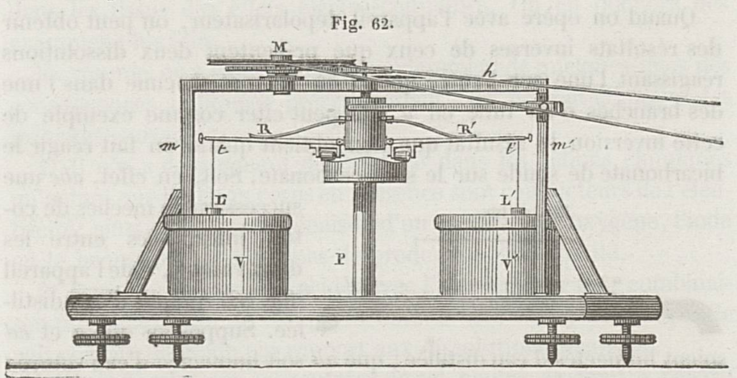
Le premier appareil se compose d'un vase cylindrique en verre V, contenant la dissolution qui doit être traversée par le courant, et sur les bords duquel est fixé un anneau à recouvrement en laiton, interrompu en deux points *p*, *p'*. Chacune des moitiés de cet anneau est pourvue d'un appendice avec vis de pression pour y adapter un fil métallique mis en communication avec l'un des pôles d'un appareil à courant constant. Ce vase est placé entre deux montants verticaux en laiton *m*, *m'*, liés ensemble au moyen d'une traverse horizontale *h* de même métal, et sur laquelle est adapté un engrenage et une roue à gorge M, mise en mouvement au moyen d'une corde sans fin et d'un moteur électro-magnétique. Cette roue fait mouvoir un cylindre vertical C, en cuivre rouge, sur la surface duquel sont incrustées deux lames minces d'ivoire qui constituent un second interrupteur. Sur ce cylindre viennent s'appliquer deux lames de cuivre *s*, *s'*, faisant ressort et mises, chacune, en communication avec un appendice fixé à l'un des montants et isolé au moyen d'une pièce en ivoire, appendice qui est mis en rapport avec l'un des bouts du fil du multiplicateur ou d'une boussole des sinus.

A chacune des lames est fixée une branche de métal horizontale, terminée par une lame mince de cuivre recourbée formant ressort, et venant s'appliquer avec pression sur la garniture du vase de verre.

L'une des branches horizontales est interrompue par une petite lame d'ivoire, près des points de contact de cette dernière, et sur la branche même se trouvent deux petites ouvertures avec vis, et dans lesquelles sont fixés deux fils de platine verticaux, à l'extrémité inférieure desquelles sont soudées des lames de même métal L, L'.

Cet appareil remplit les fonctions de double interrupteur. Aussitôt que le mouvement de rotation commence, chaque moitié de la traverse horizontale mobile est mise successivement en communication, tantôt avec l'un des pôles de l'appareil électro-chimique, tantôt avec l'autre. Le deuxième interrupteur met constamment en communication la lame qui est positive avec la même extrémité du fil du multiplicateur, en sorte que la déviation de l'aiguille aimantée a toujours lieu dans le même sens. Si le couple électro-chimique est à courant constant, la déviation de l'aiguille n'éprouve aucune variation pendant que les lames sont en mouvement.

Fig. 62.



Le second appareil dépolarisateur (fig. 62) diffère du précédent en ce qu'il ne possède qu'un seul interrupteur cylindrique, et qu'il est pourvu de deux vases VV' au lieu d'un seul. Au-dessus de cet interrupteur est fixé un autre cylindre fixe et évidé intérieurement, et dont le bord supérieur, au lieu d'être partout horizontal, est échancré en plan légèrement incliné, de manière à produire l'effet suivant : la traverse mobile qui porte les deux tiges *t'*, à l'extrémité desquelles sont soudées les lames de platine L, L', est composée de deux parties mobiles dans le sens vertical au moyen d'une charnière, et dans le sens horizontal à l'aide d'un rouleau d'acier qui repose sur le bord supérieur du cylindre échancré. Lorsque le cylindre interrupteur est en mouvement, les deux branches des ailes *a*, *a'* s'élèvent ou s'abaissent alternativement, de manière à transporter chaque lame de platine d'un vase dans l'autre. Les deux vases renferment, suivant les expériences que l'on a en vue, le même liquide ou deux liquides différents. L'interrupteur met toujours en relation la lame positive ou la lame négative avec le même bout du fil du multiplicateur. La communication entre les

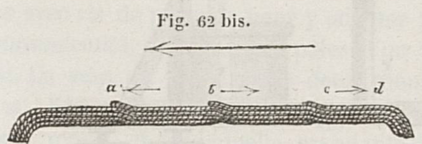
deux vases est établie, soit avec un arc en platine, soit avec une mèche de coton ou un tube en U rempli d'un liquide conducteur.

Ces appareils sont mis en mouvement au moyen d'un petit électromoteur construit par M. Froment, et dont nous donnerons la description dans la suite de cet ouvrage.

Lorsqu'on veut chercher à l'aide de ces instruments, par exemple, à l'aide du second appareil (fig. 62), la réaction électrique qui s'exerce entre deux dissolutions, on place entre les vases V et V′ de l'appareil une mèche de coton ou d'asbeste disposée comme dans la figure 59 ter.

Quand on opère avec l'appareil dépolarisateur, on peut obtenir des résultats inverses de ceux que présentent deux dissolutions réagissant l'une sur l'autre quand on les met chacune dans l'une des branches d'un tube en *u*. On peut citer comme exemple de cette inversion le résultat que l'on obtient quand on fait réagir le bicarbonate de soude sur le sous-carbonate. Soit, en effet, *abc* une succession de mèches de coton interposées entre les deux vases V, V′ de l'appareil (fig. 62) remplis d'eau distillée. Supposons que *a* et *cd* soient humectés d'eau distillée; que *ab* soit humectée d'eau saturée de sous-carbonate de soude, et *bc* d'eau saturée de bicarbonate de la même base. On observe, quand l'appareil dépolarisateur fonctionne, un courant dirigé dans le sens de la grande flèche, mais il n'est que la résultante de trois courants partiels représentés par les trois petites flèches, et qui ont lieu en *a*, *b* et *c*, à la surface de séparation des liquides. En effet en *a*, entre l'eau et le sous-carbonate, on a un courant allant de la dissolution saline à l'eau; en *b*, entre les deux dissolutions salines, le courant est en sens contraire; en *c*, il est dirigé de la dissolution à l'eau: les deux derniers sont inverses du premier, mais leur somme est moins forte, puisque le courant final est dans la direction du premier.

Fig. 62 bis.



Ainsi, en tenant compte de l'action de l'eau distillée, on peut obtenir des effets inverses de ceux que donneraient deux dissolutions en réagissant l'une sur l'autre.

Les diverses expériences faites par cette méthode ont conduit à ce fait général: lorsque l'eau et plusieurs solutions neutres, acides ou alcalines, sont en contact deux à deux, de manière à ne se combiner ou à ne se mélanger que très-lentement, l'effet électrique

produit est la résultante des effets électriques individuels qui ont lieu à chaque surface de contact. On doit remarquer que ce fait est en opposition avec le principe avancé par Volta, savoir que, lorsque plusieurs substances solides ou liquides sont en contact les unes à la suite des autres, les effets électriques qui se produisent sont les mêmes que si les deux substances extrêmes étaient immédiatement en contact. Une conséquence qui en résulte, c'est que l'on peut former des chaînes électriques avec des liquides seuls; l'existence de telles chaînes dans les corps organisés produit nécessairement dans les tissus des effets électro-chimiques. On en donnera des exemples plus loin.

En résumé, on a trouvé qu'indépendamment de quelques-unes des conséquences indiquées précédemment, on pouvait admettre les principes suivants :

1° Il n'y a dégagement d'électricité dans les actions chimiques qu'autant que les deux corps en présence sont conducteurs de l'électricité; ainsi, dans la combinaison d'un métal avec l'oxygène, l'iode ou le brome sec, il n'y a pas de production d'électricité.

2° Dans le mélange des acides avec l'eau ou dans leur combinaison avec elle, l'eau se comporte comme une base, tandis qu'elle agit comme un acide par rapport aux dissolutions alcalines.

3° Les dissolutions concentrées de sel neutre agissent à l'égard de l'eau, sous le rapport des effets électriques produits, comme les acides par rapport aux bases.

4° Les acides, dans leur combinaison ou leur mélange avec d'autres acides, se comportent de telle sorte que les acides les plus oxydants sont les plus électro-positifs. Les acides, dans leurs combinaisons avec les bases, paraissent conserver cette même propriété, de telle sorte que, dans la réaction ou le mélange de deux dissolutions saturées de sel neutre, le nitrate est positif par rapport au sulfate, le sulfate à l'égard du phosphate, etc.

5° Lorsque plusieurs dissolutions acides, neutres ou alcalines sont placées les unes à côté des autres de manière à se mélanger très-lentement, les effets électriques produits sont la résultante des effets individuels qui ont lieu à chaque surface du contact.

6° Contrairement à l'opinion de Volta, on peut former une chaîne électrique ou plutôt un circuit fermé uniquement avec des liquides dans lesquels circule un courant, et d'où résultent des phénomènes de décomposition et de recomposition s'il existe dans ce circuit des corpuscules conducteurs de l'électricité. Les corps orga-

nisés vivants présentent des exemples nombreux de circuits de ce genre pouvant donner lieu à des effets électro-chimiques qui n'ont pas encore été étudiés.

Nous venons de voir que les dissolutions, en réagissant les unes sur les autres, donnent lieu à des effets électriques analogues à ceux que l'on observe dans les combinaisons; il faut montrer actuellement comment on peut reconnaître, au moyen de ces effets, s'il y a simplement combinaison ou solution, ce qui n'est pas toujours facile, quand les réactions sont tellement faibles, qu'il en résulte de si petites quantités de composés qu'il est impossible d'en constater l'existence, ou bien quand il n'y a que de très-faibles variations de température. On opère de la manière suivante, d'après M. Peltier : l'appareil complet se compose de deux multiplicateurs, d'une pile thermo-électrique et de deux capsules en platine. On en prend une, que l'on met en communication avec l'un des bouts du fil d'un multiplicateur à fil long; puis on dispose un trépied thermo-électrique composé de trois couples, bismuth et antimoine, dont les extrémités inférieures sont de rang pair ou impair, afin qu'étant échauffées ou refroidies en même temps, elles produisent des courants dirigés dans le même sens; on place ensuite la seconde capsule en communication avec l'autre bout du fil du multiplicateur sur le trépied ou pile thermo-électrique qui est en relation avec le multiplicateur à fil court, et l'on joint les deux capsules au moyen d'une mèche de coton ou d'asbeste. On verse dans chaque capsule une dissolution, et les deux dissolutions agissent alors l'une sur l'autre. S'il y a combinaison, les deux capsules s'échauffent; celle qui repose sur le trépied lui communique une portion de la chaleur qu'elle a prise, et qui est aussitôt accusée par l'aiguille du multiplicateur thermo-électrique. S'il y a simplement solution, l'abaissement de température de la capsule produit un courant thermo-électrique dirigé en sens inverse du premier, en sorte que la direction du courant thermo-électrique suffit pour indiquer quand il y a combinaison ou solution, lors même que les variations de température qui en résulteraient seraient excessivement faibles, et exigeraient des thermomètres d'une très-grande sensibilité pour être appréciées.

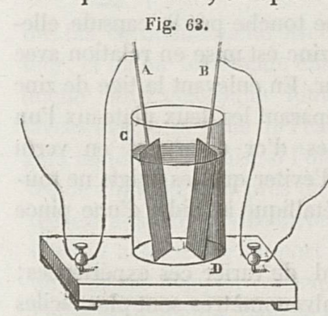
Actions des acides et des dissolutions sur les métaux. Lorsque l'on plonge l'un après l'autre dans l'acide nitrique ordinaire les deux bouts du fil de cuivre d'un multiplicateur, on a aussitôt un courant électrique qui réagit sur l'aiguille aimantée de telle manière que le bout plongé le premier prend au liquide l'électricité positive. Cet

effet est dû à la différence des actions chimiques exercées par l'acide sur les bouts du fil, différence en faveur du bout plongé le dernier qui est le plus attaqué, attendu que sa surface est recouverte d'une couche d'oxyde. Dès lors, quand un acide réagit sur un métal, celui-ci dégage de l'électricité négative, et l'acide de l'électricité positive.

Plongeons dans de l'acide nitrique pur deux des bouts de deux fils d'or à surface très-propre, en communication par les deux autres bouts avec les extrémités du fil d'un multiplicateur à fil long : il ne se produit aucun effet; mais, si l'on ajoute une très-petite quantité d'acide chlorhydrique près de la partie immergée de l'un des deux bouts, l'aiguille aimantée accuse aussitôt, par sa déviation, la production d'un courant, dont la direction indique que le bout attaqué prend à l'acide l'électricité négative, et lui donne l'électricité positive. En remplaçant l'un des fils d'or par un fil de platine, les effets sont les mêmes, c'est-à-dire qu'il n'y a production de courant qu'autant qu'on ajoute de l'acide hydrochlorique; le bout attaqué prend encore l'électricité négative. Cette expérience met bien hors de doute ce fait fondamental, savoir que, lorsqu'un acide réagit sur un métal, l'acide prend l'électricité positive, le métal l'électricité négative (Becquerel).

On peut obtenir des effets analogues avec d'autres métaux et d'autres liquides actifs; on opère alors en plaçant le liquide que l'on emploie dans un vase CD (fig. 63), et en plongeant les deux lames métalliques A et B, sur lesquelles on agit, dans ce liquide, ces lames étant en relation avec les extrémités d'un multplicateur.

Fig. 63.

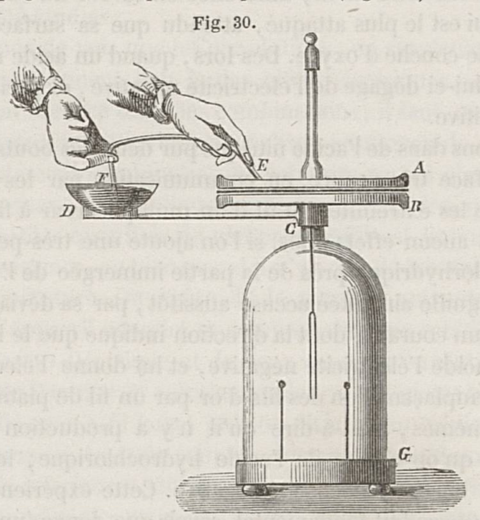


Si l'on opère avec du zinc et du platine, le liquide étant de l'eau acidulée par l'acide sulfurique, le zinc est négatif, le platine positif. Le système formé par l'ensemble des deux lames et du liquide constitue un couple analogue à celui de Volta : l'électricité se produit à la surface de séparation du zinc et du liquide; le platine est là seulement pour recueillir une portion de l'électricité positive du liquide.

Les effets électriques dus aux réactions exercées par les liquides sur les métaux peuvent être également observés à l'aide des électroscopes; mais ils ne sont appréciables que lorsque leur intensité est

suffisante. En opérant avec le zinc, on peut se servir de l'appareil déjà décrit page 55, et qui est représenté (fig. 30). On place sur

Fig. 30.



l'anneau D communiquant au plateau inférieur B d'un électromètre condensateur très-sensible, une capsule en platine dans laquelle on verse de l'eau acidulée avec une ou deux gouttes d'acide sulfurique. On plonge une lame de zinc par une de ses extrémités dans l'eau de la capsule, en ayant soin qu'elle ne touche pas la capsule elle-même; l'autre extrémité de la tige de zinc est mise en relation avec le plateau supérieur A du condensateur. En enlevant la tige de zinc immédiatement après le contact, et séparant les deux plateaux l'un de l'autre, on trouve que les feuilles d'or divergent en vertu d'un excès d'électricité positive. Afin d'éviter que les doigts ne touchent le zinc, on soutient la lame métallique à l'aide d'une pince de verre enduite de gomme laque.

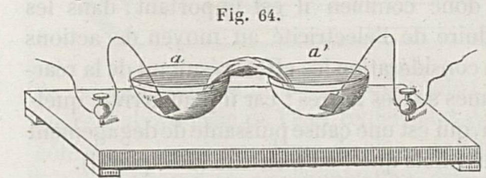
Il est facile, comme on le comprend, de varier ces expériences; mais les observations faites avec les galvanomètres sont plus faciles pour mettre bien en évidence les différentes conditions nécessaires au développement de l'électricité dans les réactions exercées sur les métaux. Nous avons supposé qu'un seul des deux métaux plongés est attaqué par le liquide; mais, si les deux le sont à la fois, on a toujours un courant électrique dû à la différence des effets; le métal le plus attaqué prend l'électricité négative. L'expérience suivante montre bien l'influence de l'action chimique. Si l'on prend pour lames

métalliques des lames de fer et de cuivre, et qu'on les plonge, comme l'indique la figure 63, dans de l'eau acidulée par l'acide sulfurique, il se produit un courant électrique dirigé de telle manière que le fer prend au liquide l'électricité négative; le fer est dans ce cas le métal le plus attaqué. Mais si, après avoir lavé les lames dans l'eau, on les plonge de la même manière dans une solution de persulfure de potassium, on observe alors avec le multiplicateur un courant électrique dirigé en sens inverse. Dans ce cas le cuivre noircit rapidement et est attaqué plus vivement que le fer. Ainsi, suivant la nature du liquide conducteur, le même couple peut présenter un courant électrique dirigé dans un sens ou dans un autre.

Dans l'action des dissolutions sur les métaux, on doit encore avoir égard aux effets produits, 1° par l'action des dissolutions qui se forment autour des lames sur le liquide conducteur lui-même; 2° par celle des gaz ou d'autres substances qui se déposent sur les lames. Nous allons parler d'abord des premiers effets, il sera question ensuite avec détails des seconds, appelés effets de polarisation.

Reprenons l'expérience déjà citée. Soient deux capsules *a*, *a'* remplies d'acide azotique et communiquant ensemble au moyen d'une mèche d'asbeste. Si l'on prend deux lames d'or en relation par des fils de même métal avec les extrémités du fil d'un multiplicateur, et qu'on les plonge chacune dans l'une des capsules, il n'y a aucun effet électrique toutes les fois que les surfaces ont été lavées avec soin dans de l'eau distillée pour enlever les corps étrangers adhérents : mais, si l'on verse dans la capsule *a* quelques gouttes de chlorure d'or près de la lame qui y plonge, l'aiguille aimantée est aussitôt déviée fortement, dans un sens tel que le bout *a* devient négatif par rapport au liquide; si au lieu de la dissolution de chlorure d'or, on verse quelques gouttes d'acide chlorhydrique, l'effet est le même. Dans le premier cas, l'effet est dû à la réaction de l'acide nitrique sur le chlorure d'or; dans le deuxième, à la réaction de l'eau régale sur l'or, et à celle de la dissolution formée sur l'acide nitrique. Voilà donc deux causes donnant lieu à un dégagement d'électricité dans le même sens, attendu que la dissolution d'or est négative par rapport à l'acide.

Fig. 64.



Si l'on remplit d'une dissolution de nitrate de cuivre les deux capsules *a* et *a'* mises en communication au moyen d'une mèche

de coton, et que l'on plonge dans chacune d'elles le bout d'une lame de cuivre parfaitement décapée, dont l'une et l'autre sont en relation avec les deux extrémités d'un multiplicateur, il ne se produit aucun effet électrique; mais, si l'on verse une goutte d'acide nitrique dans le liquide de la capsule *a*, le cuivre qui plonge dedans devient fortement négatif. Dans ce cas, on a bien l'effet électrique résultant de la réaction de l'acide sur le métal, le courant produit dans la réaction du composé qui se forme sur la dissolution environnante devant être très-faible, et même nul, puisque la solution de nitrate est déjà saturée.

L'étain et son sulfate, le fer et son chlorure, le plomb, l'antimoine et le bismuth, agissent de même que le cuivre par rapport à ses dissolutions, quand on ajoute quelques gouttes d'acide. Il en est de même du zinc, du fer, avec les dissolutions de leur nitrate; le métal s'empare de l'électricité négative, conformément au principe général; mais avec des dissolutions de leurs sulfates, ces deux derniers métaux produisent quelquefois des effets inverses: à l'instant où l'on ajoute quelques gouttes d'acide sulfurique, le métal devient positif. On voit donc combien il est important, dans les appareils destinés à produire de l'électricité au moyen de actions chimiques, de prendre en considération les effets résultant de la réaction des dissolutions les unes sur les autres; car il peut arriver quelquefois que cette réaction, qui est une cause puissante de dégagement d'électricité, contrarie les effets que l'on a en vue (Becquerel).

Examinons quelques particularités qui peuvent se présenter dans ces expériences; les conséquences que nous en déduirons seront utiles pour la construction des couples voltaïques que nous exposerons dans le chapitre suivant.

Prenons une lame de cuivre, une lame de zinc et une solution de sulfate de zinc, chaque lame se trouvant dans une capsule particulière et les deux capsules communiquant ensemble au moyen d'une mèche de coton. A l'instant de l'immersion, le cuivre prend au liquide l'électricité positive, et le zinc l'électricité négative. Ce fait nous démontre, comme du reste on devait le présumer, que le zinc est plus attaqué par la solution que ne l'est le cuivre.

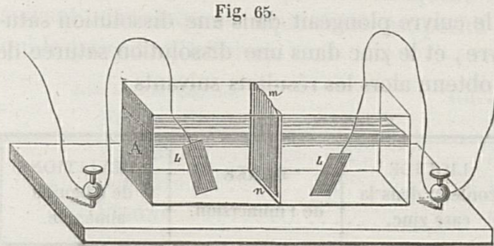
Supposons la déviation de l'aiguille aimantée de 62°; si l'on ajoute quelques gouttes d'acide nitrique ou de nitrate de cuivre dans la capsule où se trouve la lame de cuivre, et où l'action chimique est la moins forte, l'aiguille, au lieu de rétrograder, parce que le cuivre est plus attaqué, se porte à 86°, et reste stationnaire dans cette position. Pour expliquer ce fait, il suffit de tenir compte de la réac-

tion de l'acide nitrique ou du nitrate de cuivre qui se forme continuellement, sur le sulfate de zinc, et en outre de ce que, au pôle négatif, l'acide azotique ou le nitrate de cuivre enlève le gaz hydrogène provenant de la décomposition de l'eau par l'action du couple lui-même, ce qui diminue la résistance au passage, et augmente l'intensité du courant.

Du reste, les expériences suivantes montrent bien nettement la manière dont chaque dissolution se comporte vis-à-vis des métaux dans la disposition des couples voltaïques. Nous les invoquerons plus loin, quand il sera question de la construction des couples à courant constant (Becquerel).

On prend une petite boîte en verre ou en bois vernissé, divisée en deux compartiments au moyen d'un diaphragme *mn* en baudruche, appliqué soigneusement sur les parois avec du mastic, et dans chacun desquels on verse une solution de même nature ou de nature différente; dans une expérience on a opéré d'abord avec de l'eau renfermant $\frac{1}{50}$ d'acide sulfurique; d'un côté on a plongé une lame de zinc, de l'autre une lame de cuivre, l'une et l'autre en communication avec un multiplicateur. On a obtenu les résultats suivants :

Fig. 65.



1er *Tableau.*

LIQUIDE contenu dans la case cuivre.	LIQUIDE contenu dans la case zinc.	DURÉE de l'immersion.	DÉVIATION de l'aiguille aimantée.
Eau et $\frac{1}{50}$ d'acide sulfurique.		0	63°
	Id.	15 minutes.	53
		30	46

En ajoutant quelques gouttes d'acide nitrique dans la case cuivre, le courant a augmenté d'intensité, quoique le cuivre fût attaqué, et qu'il dût en résulter un courant en sens inverse. Cet effet était dû, non-seulement à la réaction des dissolvants les uns sur les autres, mais encore à ce que l'acide nitrique, en attaquant le cuivre,

facilitait le passage du courant du liquide dans ce métal et absorbait l'hydrogène naissant déposé par l'action du courant :

2e *Tableau.*

LIQUIDE contenu dans la case cuivre.	LIQUIDE contenu dans la case zinc.	DURÉE de l'immersion.	DÉVIATION de l'aiguille aimantée.
Eau et $\frac{1}{50}$ d'acide sulfurique, à laquelle on ajoute $\frac{1}{50}$ d'acide nitrique ou d'une dissolution saturée de nitrate de cuivre.	Eau et $\frac{1}{50}$ d'acide sulfurique.	0	81
		15 minutes.	73
		30	63

Passons au cas où le cuivre plongeait dans une dissolution saturée de nitrate de cuivre, et le zinc dans une dissolution saturée de sulfate de zinc; on a obtenu alors les résultats suivants :

3e *Tableau.*

LIQUIDE contenu dans la case cuivre.	LIQUIDE contenu dans la case zinc.	DURÉE de l'immersion.	DÉVIATION de l'aiguille aimantée.
Dissolution saturée de nitrate de cuivre.	Dissolution saturée de sulfate du zinc.	0	84
		15 minutes.	72
		30	68

Ces résultats mettent en évidence l'influence produite par la réaction des deux dissolutions l'une sur l'autre, car le courant est plus intense dans ce cas-ci que dans les expériences précédentes, toutes choses égales d'ailleurs, et bien que le zinc ne soit pas attaqué avec autant de force que lorsque la dissolution était acide. Dans le 2e tableau, le mélange des acides sulfurique et nitrique se trouvait dans la case cuivre; on l'a transporté dans la case zinc, alors on a eu :

4e *Tableau.*

LIQUIDE contenu dans la case cuivre.	LIQUIDE contenu dans la case zinc.	DURÉE de l'immersion.	DÉVIATION de l'aiguille aimantée.
Eau $\frac{1}{50}$ d'acide sulfurique.	Eau $\frac{1}{50}$ d'acide sulfurique, et $\frac{1}{50}$ nitrique.	0	62
		15 minutes.	64
		30	61

Les déviations ayant été successivement égales à 62°, 64°, 61°, le courant tendait donc ainsi à devenir constant. Nous verrons ultérieurement les conditions à remplir pour construire les appareils à force constante. Il est prouvé seulement ici qu'en mettant dans la case cuivre de l'acide sulfurique, cet acide attaque le cuivre, concurremment avec l'acide nitrique qui s'infiltre peu à peu au travers du diaphragme, et d'où résulte un sel de cuivre dont la décomposition dépolarise la lame de cuivre et tend à rendre le courant constant. Tel est le principe des piles à courant constant, comme on le verra plus loin.

En plongeant dans l'acide nitrique concentré et dans l'acide nitrique étendu divers couples métalliques, on forme le tableau suivant, dans lequel chaque métal est positif par rapport à celui qui le précède (Delarive).

Acide nitrique concentré.	Acide nitrique étendu.
Fer oxydé	Argent.
Argent	Cuivre.
Mercure	Fer oxydé.
Plomb	Fer.
Cuivre	Plomb.
Fer	Mercure.
Zinc	Étain.
Étain	Zinc.

Ces résultats montrent de suite l'influence de l'action chimique sur le dégagement de l'électricité, puisque l'ordre des métaux change avec le degré de concentration de l'acide nitrique.

Un couple or et cuivre ne donne aucun effet quand on emploie le mercure comme corps liquide. M. Delarive a émis le doute que la formation d'un amalgame fût une véritable action chimique; mais cette assertion ne saurait être fondée, attendu qu'il y a combinaison en proportions définies. Il y a sans nul doute des effets électriques produits; mais le multiplicateur ne peut les accuser, attendu que les deux électricités trouvent plus de facilité à se recombiner sur la surface de contact de l'or et du mercure qu'à suivre le fil du multiplicateur (Becquerel).

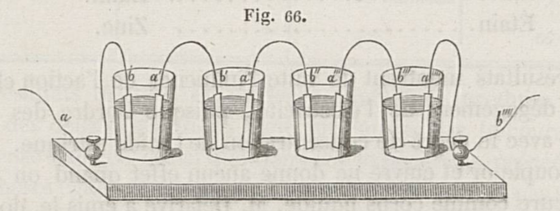
Effets électriques dus au contact des gaz et des métaux inoxydables. Lorsqu'une lame de métal plonge dans un liquide capable de réagir chimiquement sur elle, on a vu qu'il se produit un dégagement d'électricité dont on a donné les lois : ce dégagement

est nul si la lame n'est pas attaquée, à moins qu'elle ne soit recouverte de substances solides ou gazeuses capables de réagir chimiquement sur le liquide. Nous avons étudié ce qui arrivait avec des substances solides; il nous reste à montrer comment se comportent les gaz dans la même circonstance.

Quand on décompose de l'eau distillée avec deux lames de platine plongeant dedans et en communication avec une pile voltaïque, si l'on interrompt la communication au bout de quelques instants, et qu'ayant détaché les deux lames des extrémités de la pile on les réunisse avec un fil en relation avec un multiplicateur, il se produit un courant dirigé en sens inverse du premier, c'est-à-dire que la lame qui primitivement était le pôle positif devient le pôle négatif, et réciproquement; cet effet se reproduit également en opérant avec un seul couple; peu à peu le courant diminue d'intensité et finit par disparaître. Le courant électrique qui se manifeste dans cette circonstance a reçu le nom de courant secondaire, et l'action en vertu de laquelle l'effet électrique se produit par suite du transport des gaz sur les lames décomposantes, porte le nom de *polarisation* des électrodes ou des lames décomposantes.

Pile secondaire. On peut, en réunissant plusieurs couples semblables au précédent, former une *pile secondaire*, comme l'a montré pour la première fois Ritter. On prend plusieurs bocaux (fig. 66),

Fig. 66.



que l'on remplit d'eau acidulée ou même d'une solution de sulfate de potasse, et l'on joint les vases par des arcs métalliques formés d'un seul métal, de platine ou de cuivre, ab, $a'b'$, $a''b''$, $a'''b'''$, etc.; cette réunion de vases ne donne lieu à aucun effet électrique, puisqu'un seul métal se trouve plongé dans le même liquide conducteur. Mais si l'on fait passer pendant quelques instants un courant électrique dans le circuit, en mettant a en communication avec l'un des pôles d'une pile, et b'''' avec l'autre pôle, en interrompant le circuit et établissant la communication entre les deux extrémités a et b'''' et un multiplicateur, on trouve alors que l'appareil fonctionne comme une pile. D'autres effets, en outre, sont produits, tels que la décom-

position de l'eau, etc.; mais l'action de cette pile secondaire est de courte durée et finit par s'anéantir quand les produits déposés sur les lames *b*, *a'*, *b'*, *a''*, etc..., et qui donnent lieu au courant ont disparu. La direction du courant secondaire est inverse de celui qui circulait primitivement dans l'appareil, et cela par suite des réactions chimiques produites sur le liquide ambiant.

On peut employer toute autre disposition pour manifester le phénomène. Une pile à colonne, formée seulement d'une succession de rondelles de cuivre et de drap humecté de sulfate de potasse, donne un résultat analogue.

Les effets produits s'expliquent comme il suit : Quand deux lames de platine plongeant dans une solution saline font partie d'un circuit voltaïque, la surface de la lame positive se recouvre d'éléments acides et d'oxygène, et la surface de la lame négative d'éléments alcalins et d'hydrogène. Les deux lames se trouvent donc dans le même état que si la première avait été mise en contact avec une solution acide, et que l'autre eût été plongée dans une solution alcaline; dans les deux cas, les effets sont les mêmes. On a montré précédemment ce qui arrive en mettant une lame dans une solution de potasse, et l'autre dans de l'acide nitrique (Becquerel); on peut également, en mettant en contact pendant quelque temps les lames avec du gaz hydrogène et du gaz oxygène, puis les plongeant dans de l'eau distillée, produire des effets analogues (Matteucci). On obtient ainsi, en mettant en relation ces lames avec les extrémités d'un multiplicateur, des déviations considérables : la lame recouverte d'oxygène prend à l'eau l'électricité positive, et celle recouverte d'hydrogène, l'électricité négative; ces deux gaz, en réagissant sur l'eau, donnent donc lieu à des effets électriques semblables à ceux que l'on aurait obtenus directement dans la combinaison de l'oxygène avec l'hydrogène. Les lames conservent pendant longtemps cette propriété. Il est nécessaire, pour la leur enlever au bout de plusieurs heures, de les faire rougir.

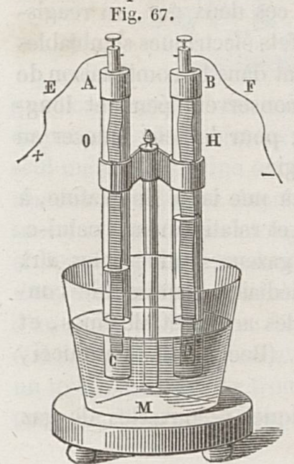
L'azote se comporte, quand il adhère à une lame de platine, à l'égard de l'oxygène comme l'hydrogène, et relativement à celui-c comme l'oxygène. Ainsi des particules gazeuses adhérentes aux lames métalliques exercent, par l'intermédiaire d'un liquide conducteur, la même action que des particules acides et alcalines, et peuvent constituer des couples voltaïques. (Becquerel, Matteucci, Schoenbein, Peltier, etc.)

Polarisation. Lorsque les lames métalliques recouvertes de gaz

produisent des effets secondaires, on dit que les lames sont *polarisées*. Nous avons montré dans le livre précédent, page 110, l'emploi que l'on avait fait de la polarisation pour déterminer les rapports existant entre les effets dus à l'électricité statique et à l'électricité dynamique. Dans la construction des couples voltaïques, on doit toujours avoir égard à ces effets, car non-seulement la résistance au passage qui résulte de la polarisation des lames augmente la résistance à la conductibilité du circuit, mais encore les effets secondaires peuvent masquer quelquefois le résultat que l'on veut obtenir.

Nous citerons à ce sujet l'expérience suivante : supposons que l'on forme un circuit voltaïque à l'aide d'un couple ordinaire, platine et zinc, ou cuivre et zinc, et d'un multiplicateur; l'aiguille aimantée du multiplicateur se déviera, mais la déviation ne sera pas constante; elle diminuera même au bout de quelque temps. Mais, si on introduit dans le circuit un appareil à décomposer l'eau, c'est-à-dire un vase contenant de l'eau acidulée et deux électrodes en platine, le courant du couple passera alors dans l'eau acidulée et dans le multiplicateur. Dans les premiers moments, l'aiguille aimantée sera vivement déviée; mais peu à peu la déviation diminuera et l'aiguille reviendra près du zéro. Cet effet provient de ce que les lames de platine dans l'eau acidulée se polarisent et donnent un courant secondaire qui tend à détruire complétement le premier courant. Nous verrons dans le chapitre suivant que dans les piles à courant constant, pour avoir le maximum d'effet, il faut détruire la polarisation des lames métalliques.

Fig. 67.



Pile à gaz. M. Grove eut l'idée de réunir en pile des couples formées par des lames de platine plongées mi-partie dans de l'oxygène ou de l'hydrogène, mi-partie dans le liquide conducteur. Il obtint ainsi ce que l'on nomme la *pile à gaz*, dans laquelle il n'entre qu'un seul liquide et un seul métal, et où l'action électrique résulte des actions exercées par les lames auxquelles adhèrent l'hydrogène et l'oxygène, ainsi qu'on l'a démontré par ce qui précède. On peut donner à chaque couple la disposition suivante :

O et H sont des tubes plongeant par

leur extrémité inférieure dans un vase contenant de l'eau acidulée; ces tubes sont terminés à leur partie supérieure par deux douilles en cuivre A et B mastiquées convenablement; ils renferment deux lames de platine AC, BD, qui occupent presque toute l'étendue du tube. On remplit les éprouvettes, l'une d'oxygène, l'autre d'hydrogène, mais de façon qu'une portion de chaque lame plonge dans l'eau acidulée contenue dans le vase inférieur. En faisant communiquer les deux fils AE et BF avec un multiplicateur, le premier, qui touche à la lame plongée dans l'oxygène, donne de l'électricité positive, et le deuxième de la négative. Plusieurs éléments réunis peuvent produire des décompositions chimiques; l'eau même est décomposée.

La cause de la production d'électricité dans la pile à gaz dépend de la combinaison lente des gaz dissous dans le liquide, sous l'action des lames de platine. En effet, quand on décompose l'eau dans un voltamètre à l'aide d'une batterie à gaz, à mesure que les volumes des gaz provenant de la décomposition de l'eau augmentent dans le voltamètre, les volumes de l'oxygène et de l'hydrogène de chaque couple à gaz diminuent dans la même proportion; cet effet montre que, dans chaque couple, il se forme de nouveau autant d'eau qu'il y en a de décomposée dans le voltamètre. Le résultat suivant vient à l'appui de cette explication : Lorsqu'une batterie à gaz reste sous une cloche privée d'oxygène, l'intensité du courant devient nulle; il reprend sa force quand on introduit de nouveau de l'air sous la cloche.

Il résulte de là que du gaz hydrogène seul d'un côté en contact avec une des électrodes et de l'eau acidulée ne peuvent constituer un couple; mais, aussitôt que de l'oxygène est introduit dans le liquide et qu'il arrive en contact avec le platine entouré d'hydrogène, la combinaison des deux gaz a lieu par l'intermédiaire du métal, et, quand le circuit est terminé par une seconde électrode, le courant électrique se manifeste. Ainsi il est probable que le développement de l'électricité provient de la combinaison de l'oxygène dissous dans le liquide avec l'hydrogène adhérent au platine, et que l'oxygène en contact avec la seconde lame ne sert qu'à empêcher la polarisation qui serait produite par le transport sur cette lame de l'hydrogène provenant de la décomposition du liquide conducteur. L'oxygène qui est dans le tube contenant la lame de platine positive se dissout donc dans le liquide, à mesure que celui qui était dissous précédemment se combine avec l'hydrogène.

Ce qui a lieu avec l'oxygène et l'hydrogène se produit également avec d'autres gaz ; le platine, le charbon, et les autres corps solides que l'on peut employer comme conducteurs ne sont que les intermédiaires qui déterminent la combinaison des gaz et permettent la circulation de l'électricité.

Des observations de M. Jacobi viennent démontrer nettement cette combinaison des gaz dissous dans l'eau sous l'action des lames de platine. On sait que lorsqu'on décompose l'eau dans un voltamètre, et que les gaz mixtes sont recueillis dans la même cloche, si les électrodes en platine plongent en partie dans le mélange de gaz, après que la décomposition a cessé, on voit peu à peu les gaz disparaître. Mais on trouve également que dans les voltamètres, lorsque les lames décomposantes sont séparées des gaz mixtes, le volume du mélange diminue toujours peu à peu, même lorsqu'il y a 30 centimètres d'eau entre les gaz et les électrodes; ainsi, dans ce dernier cas, la combinaison ne peut s'opérer que dans le liquide, à mesure que les gaz se dissolvent et viennent en contact avec les lames de platine.

On a émis l'opinion que chaque gaz en contact avec le platine et l'eau agissent séparément pour produire un courant; mais cela ne saurait avoir lieu dans la généralité des cas. Cependant dans certaines conditions, comme on va le voir, des effets de ce genre peuvent se manifester.

Action de l'hydrogène sur le chlorure d'or en présence du platine. Si l'on place une petite éprouvette AB, faite avec un tube de 2 à 3 millimètres de diamètre, et remplie de gaz hydrogène, sur un vase contenant une dissolution assez concentrée de chlorure d'or, au bout de quelques jours, si la température n'a pas sensiblement varié, le niveau du chlorure d'or à l'intérieur du tube est peu différent de ce qu'il était précédemment; mais si l'on introduit un fil de platine au-dessous de l'éprouvette, de manière que ce fil se trouve en partie plongé dans le gaz hydrogène, et en partie plongé par son autre extrémité dans le chlorure d'or, on voit alors le gaz diminuer de volume à l'intérieur, et même au bout d'un certain temps disparaître complétement si le fil de platine monte jusqu'en haut du tube. Mais en même temps que le gaz hydrogène disparaît, de l'or métallique se précipite sur la portion du fil de platine qui plonge dans la dissolution métallique. (E. Becquerel.)

Fig. 68.



Ce fait met bien en évidence que le gaz hydrogène peut réduire une dissolution de chlorure d'or en présence du platine ; mais on peut objecter à cela :

1° Que le fil de platine peut être attaqué dans le chlorure d'or, et donner lieu à la réduction de l'or à sa surface ;

2° Que l'air extérieur peut constituer avec l'hydrogène de l'éprouvette, le liquide et le platine un couple à gaz.

On répond à la première objection en montrant par une expérience analogue à celle qui précède qu'un fil de platine bien décapé, en l'absence de l'hydrogène, ne se recouvre pas d'or quand on le fait plonger pendant quelque temps dans une solution de chlorure de ce métal aussi neutre que possible. La deuxième objection peut être évitée en opérant dans des tubes exactement fermés, et soustraits à l'action de l'air extérieur, comme on va le voir ci-après.

Pour cela on dispose les appareils comme il suit : On fait passer un courant de gaz hydrogène ou du gaz sur lequel on veut opérer dans un tube effilé et ayant une petite pointe que l'on peut casser ou foudre à volonté. En cassant ensuite une des pointes sous une solution de chlorure d'or, on peut en dilatant le gaz faire entrer un peu de chlorure d'or dans le tube, puis, en fermant de nouveau la pointe avec une lampe à alcool, on a un tube plein de gaz et renfermant une petite quantité de chlorure d'or. Si l'on a eu soin de placer dans le tube, avant le passage du gaz, un fil de platine, ce fil y reste enfermé après les différentes opérations que l'on a fait subir au tube pour le remplir de gaz et pour le fermer.

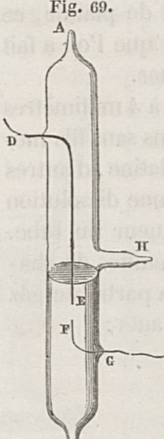
On a préparé d'après cette méthode des tubes de 3 à 4 millimètres de diamètre pleins d'hydrogène et pleins d'air, les uns sans fils métalliques intérieurement, d'autres avec des fils de platine, d'autres enfin avec des fils d'or ; dans tous on a fait entrer une dissolution de chlorure d'or de manière à occuper $\frac{1}{10}$ de la longueur du tube. Après six semaines d'action on a cassé une des extrémités de chaque tube sous une cuve à eau, afin de reconnaître la partie du gaz qui avait été absorbée. On a trouvé les résultats suivants :

SUBSTANCES RENFERMÉES DANS LES TUBES.	DIMINUTION DU GAZ INTÉRIEUR.	OBSERVATIONS.
1° Hydrogène et chlorure d'or sans fil métallique...	Insensible.	» »
2° Hydrogène, fil de platine et chlorure d'or...	$\frac{1}{5}$ du volume......	La partie du fil plongée dans le chlorure d'or est recouverte d'or.
3° Hydrogène, fil d'or et chlorure d'or.........	A peine sensible.	» »
4° Air, platine et chlorure d'or................	A peine appréciable.	Aucun dépôt sur le platine.

Il est évident d'après cela que, même en l'absence de l'air, le gaz hydrogène peut réduire une dissolution de chlorure d'or et être absorbé par elle, mais sous l'influence du platine seulement. L'or, dans les mêmes conditions, n'a pas donné d'effet appréciable dans l'espace de six semaines. On doit ajouter que l'analyse n'a accusé aucune trace de platine dans la dissolution, ce qui indique bien que le fil de platine a seulement joué ici le rôle de conducteur, puisqu'il n'a pas été dissous, et qu'il a agi par une action propre. Peut-être entre le gaz hydrogène et le chlorure d'or en présence du platine se produit-il un effet du même genre qu'entre l'hydrogène et l'oxygène sous l'action de ce métal.

Les résultats précédents conduisent à former des couples en ne faisant usage que de platine, d'hydrogène et de chlorure d'or; voici leur disposition : AC est un tube de verre de 10 à 15 millimètres de diamètre, effilé en A et en C; une petite tubulure H peut être fermée à la lampe, de sorte que, la partie inférieure du tube AC étant pleine de liquide, on peut faire circuler un courant de gaz entre A et H, et par conséquent remplir la partie supérieure du tube de gaz hydrogène. Deux fils de platine DE, GF, sont soudés au tube et viennent dans l'intérieur de façon à ce que leurs extrémités se trouvent éloignées de quelques millimètres ; on met alors du chlorure d'or au bas du tube, afin que la partie inférieure du fil DE vienne y plonger; on fait arriver le gaz hydrogène en HA, et on soude à la lampe les parties effilées A et H, pour intercepter l'action de l'air extérieur.

Fig. 69.



Si alors on établit la communication entre les deux fils D et G et

les deux extrémités d'un galvanomètre, on voit aussitôt l'aiguille se dévier et indiquer que le fil DE, plongé en partie dans l'hydrogène, prend l'électricité négative, et le fil FG la positive.

On peut préparer ainsi des piles en réunissant plusieurs couples. On voit donc que, dans ces conditions, le platine, l'hydrogène et une dissolution de chlorure d'or peuvent constituer une pile à gaz agissant d'une manière continue. Le gaz hydrogène, bien entendu, est absorbé à mesure que l'action a lieu et la pression diminue à l'intérieur des tubes. On reconnaît en outre que de l'or métallique se dépose d'abord sur la partie inférieure du fil DE. Dans une expérience on a laissé le circuit fermé dans la pile de quatre éléments, et, au bout de deux mois et demi, on a trouvé un dépôt d'or métallique sur les fils FG ; ce résultat est facile à expliquer, ces fils, dans chaque élément, formant le pôle négatif d'un appareil décomposant.

On peut montrer par le tableau suivant la comparaison des résultats obtenus avec ceux qui se produiraient dans des couples disposés comme le précédent, mais dans lesquels on emploierait comme liquide, de l'eau acidulée, ou une autre dissolution que le chlorure d'or :

	PILE A CHLORURE D'OR ET HYDROGÈNE. Le fil de platine plongé dans l'hydrogène est négatif.			PILE A EAU ACIDULÉE ET HYDROGÈNE. Le fil de platine plongé dans l'hydrogène est négatif.			PILE A SULFATE DE CUIVRE ET HYDROGÈNE. Le fil de platine plongé dans l'hydrogène est négatif.		
18 juillet 1852.	Déviat. définitive du galvanomèt.		30°	Déviat. définitive du galvanomèt.		35°	Déviat. définitive du galvanomèt.		2°
19 juillet »	»	»	16,75	»	»	2,5	»	»	1,7
20 juillet »	»	»	17,50	»	»	0,8	»	»	1,3
21 juillet »	»	»	24,80	»	»	0,8	»	»	1,2
22 juillet »	»	»	15	»	»	0,75	»	»	1,3
24 juillet »	»	»	»	»	»	»	»	»	1,0
29 juillet »	»	»	38	»	»	0	»	»	0,5
31 juillet »	»	»	35	»	»	0	»	»	0,5
10 octobre »	»	»	24	»	»	»	»	»	0

On voit que la pile à chlorure d'or et à hydrogène a toujours manifesté une action électrique, mais, comme on l'a dit précédemment, avec des variations d'intensité.

En employant l'eau acidulée, le premier jour on a eu un effet dû probablement à l'oxygène que le liquide renfermait; le lende-

main, l'action a diminué; dix jours après, le galvanomètre très-sensible dont on faisait usage n'indiquait plus aucune action. Ce résultat était prévu, puisque, d'après ce que l'on a vu précédemment, dans les piles à gaz avec l'eau acidulée, l'intervention de l'oxygène est indispensable à la production du courant.

L'eau saturée du sulfate de cuivre a encore donné une déviation après quinze jours d'action; après trois mois, elle n'était plus appréciable.

Dans chaque cas, la déviation a été dans le même sens : le fil plongé en partie dans l'hydrogéne a pris l'électricité négative.

D'après ce qui a été dit plus haut, on peut se rendre compte, comme il suit, du dégagement d'électricité dans la première pile: dans la pile à gaz telle qu'elle était connue, le gaz oxygène est nécessaire, comme on vient de le rappeler; dans celle où le chlorure d'or remplace l'eau acidulée, il est probable que, bien qu'il n'y ait pas de chlore en excès dans le liquide, le chlorure d'or et l'hydrogène, en présence du platine, éprouvent une action analogue à celle qui a lieu entre l'oxygène et l'hydrogène, c'est-à-dire qu'il y a action chimique, formation d'acide chlorhydrique et dépôt métallique sur la platine.

D'autres dissolutions peuvent présenter les mêmes propriétés, mais les essais tentés jusqu'à présent sur celles qui n'absorbent pas l'hydrogène dans les conditions ordinaires n'ont pas donné de résultats satisfaisants (E. Becquerel).

Action des gaz sur les plateaux d'un condensateur. Il existe des circonstances dans lesquelles les gaz interviennent encore dans le développement des effets électriques; peut-être se produit-il également des réactions chimiques? C'est pour ce motif que nous ne devons pas omettre de les mentionner ici.

Lorsque l'on superpose l'un sur l'autre deux plateaux de condensateur, l'un de platine et l'autre d'or, ou du moins à surface dorée, et qu'on établit entre eux la communication au moyen d'un arc métallique maintenu par un manche isolant, on a toujours une charge d'électricité: le platine est négatif et l'or positif. Les partisans de la théorie du contact ont allégué ce fait comme une preuve que le contact seul dégageait de l'électricité, indépendamment de toute action chimique. Les partisans de la théorie électro-chimique, au contraire, ont expliqué le résultat en admettant que le platine s'oxydait très-lentement à l'air. Ce dernier effet est difficile à prouver; cependant l'expérience suivante montre d'une manière directe qu'il faut chercher

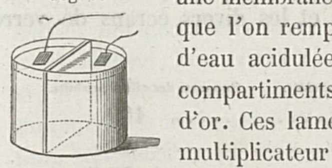
peut être dans la condensation des gaz à la surface des métaux la cause des effets électriques de tension observés. Si un condensateur est formé de deux plateaux massifs de platine, vernis sur les faces en regard seulement, et qu'après un séjour de quelque temps dans l'air on vienne à mettre les plateaux en communication avec un arc également en platine, il ne se manifeste aucune action; mais si, ayant enlevé un des plateaux, on le plonge pendant quelques instants dans du gaz hydrogène, qu'on le replace de nouveau sur l'autre et que l'on établisse immédiatement une communication entre eux, le condensateur se charge très-sensiblement. Le platine qui a été plongé dans l'hydrogène prend l'électricité positive; celui qui est resté dans l'air, l'électricité négative. Cet effet ne dure que pendant quelque temps. A chaque immersion du premier plateau dans l'hydrogène, les mêmes effets se reproduisent (E. Becquerel).

Si l'on se reporte à la première expérience, on ne saurait douter que, lorsqu'on opère avec un plateau d'or et un autre de platine, l'or, ayant pour les gaz un pouvoir condensant moindre que le platine, se comporte comme le plateau de platine couvert d'hydrogène, et doit prendre, par conséquent, l'électricité positive. En recouvrant toute la surface des plateaux de platine de vernis à la gomme laque, les effets électriques observés en plongeant un des deux plateaux dans le gaz hydrogène sont moindres; il est probable qu'avec une épaisseur de vernis suffisante, les effets électriques cesseraient tout à fait.

Effets électriques produits sous l'influence de l'action chimique de la lumière. On retrouve dans les phénomènes chimiques produits sous l'influence de la lumière les mêmes effets que ceux qui accompagnent les actions chimiques en général. Nous allons indiquer quelques-unes des circonstances dans lesquelles on les observe, afin de bien les préciser (E. Becquerel).

Soit une boîte de bois noircie intérieurement, et partagée, par une membrane très-mince, en deux compartiments que l'on remplit d'une dissolution conductrice, d'eau acidulée, par exemple. Dans chacun des compartiments on plonge une lame de platine ou d'or. Ces lames sont mises en relation avec un multiplicateur et placées horizontalement, afin d'être mieux influencées par les rayons solaires. Chaque compartiment est recouvert d'une planchette mobile qu'on enlève à volonté. Pour observer les effets électriques produits dans l'altération du

Fig. 70.



chlorure, du brômure et de l'iodure d'argent sous l'influence du rayonnement solaire, on opère comme il suit : on recouvre une des lames de platine d'une couche très-mince de chlorure d'argent nouvellement préparé que l'on fait adhérer à sa surface en chauffant légèrement, et on la replonge dans l'eau de l'un des compartiments, tandis que l'autre lame reste plongée dans l'eau acidulée de l'autre côté, sans être recouverte de chlorure. A peine la lame recouverte est-elle exposée aux rayons solaires, que le chlorure noircit; l'aiguille du multiplicateur est aussitôt chassée dans un sens qui annonce que la lame est positive. Vient-on à soustraire la lame au rayonnement solaire, l'aiguille revient à zéro. Cet effet est dû à ce que le chlorure d'argent, en perdant son chlore sous l'influence de la lumière, prend l'électricité positive qu'il transmet à la lame de platine avec laquelle il est en contact : c'est un exemple du dégagement de l'électricité dans les décompositions chimiques.

En employant, au lieu de lames inoxydables, des lames d'argent, de cuivre, de plomb, etc., à la surface desquelles on fait arriver des substances (chlore, brome, iode, oxygène) capables de former des combinaisons décomposables sous l'action de la lumière, et plaçant ces lames dans l'appareil précédent, on observe des effets analogues, mais plus ou moins marqués, dépendant de l'épaisseur et de la nature de la couche sensible; il faut également se garantir des variations de température qui peuvent survenir dans le liquide et autour des lames.

Voici quelques-uns des résultats obtenus avec des lames d'argent préalablement exposés à la vapeur d'iode ou de brome. Une lame d'argent exposée à la lumière et chargée d'une couche mince d'iode, prit au liquide l'électricité positive; avec une couche épaisse, l'effet fut inverse : dans le premier cas, la couche d'iodure d'argent passa à un état d'ioduration moindre; dans le second, l'iode réagit sur l'argent. La déviation de l'aiguille, dans les deux cas, fut de 40° à 50°, en opérant sous l'influence des rayons solaires.

Avec une couche épaisse d'iode et les divers écrans de verre coloré, on a eu :

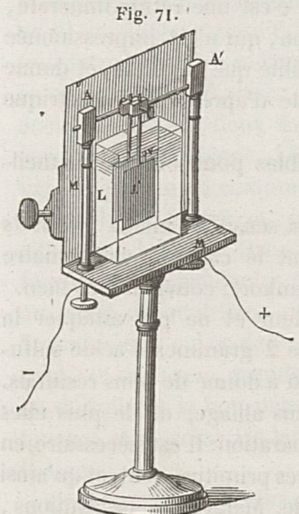
Écrans.	Intensité du courant produit.	Rapports des effets produits.
Sans écran	55	100
Verre violet	22	40
— bleu	14	25,5
— bleu	7	12,7
— rouge	1	1,8

Avec la vapeur de brome, la lame d'argent exposée aux rayons solaires est devenue également négative relativement au liquide; l'action a été assez forte pour qu'à la lumière diffuse la déviation de l'aiguille du galvanomètre fut de 50°.

La lame ayant été exposée à la lumière diffuse pendant dix minutes, puis mise à l'abri du rayonnement et exposée de nouveau à son action, la déviation n'a plus été que de 3° à 4°; la réaction était alors en grande partie terminée. Les effets électriques que nous venons d'exposer servent à reconnaître et même à mesurer les réactions qu'éprouvent les métaux et en général les corps conducteurs sur la surface desquels on dépose des couches de diverses natures, sous l'influence des rayons solaires (E. Becquerel).

Actinomètre électro-chimique. Ces expériences préliminaires ont donné lieu à la construction d'un appareil capable de faire apprécier l'énergie avec laquelle les rayons de diverse réfrangibilité agissent sur certaines combinaisons, et les effets qui se produisent quand des faisceaux de rayons actifs traversent des écrans de diverse nature ou bien ont été modifiés de différentes manières.

Fig. 71.



Cet appareil, nommé actinomètre électro-chimique, est, par rapport aux rayons actifs sur les substances impressionnables dont il s'agit, ce qu'est la pile thermo-électrique, dont on a parlé page 165, relativement aux rayons calorifiques; il peut servir dans les mêmes conditions (E. Becquerel).

Il se compose d'une cuve à eau MM' supportée par un pied en cuivre. Dans son intérieur, rempli d'une solution étendue de sulfate de soude, d'eau acidulée, ou de tout autre liquide conducteur de l'électricité, plongent deux lames d'argent L et L' très-pures, placées verticalement, peu épaisses, et attachées à deux montants en cuivre A, A'; ce sont ces montants, fixés sur le support, qui font communiquer les lames avec les deux extrémités du galvanomètre à fil long très-sensible que l'on emploie. En avant de la cuve à eau et sur le support est placé un écran en cuivre, percé d'une ouverture verticale et rectangulaire variable de largeur, et ayant la hauteur

de la cuve, de sorte qu'en éclairant l'écran, il n'y a que la portion de la lame d'argent L placée immédiatement derrière l'ouverture qui soit éclairée et qui reçoive les effets du rayonnement.

On peut à volonté placer dans l'appareil des lames d'argent recouvertes de chlorure, d'iodure, de bromure d'argent, ou d'autres lames préparées comme il a été dit plus haut. Mais nous parlerons avec détails des effets que l'on obtient en employant une substance extrêmement remarquable, qui a la propriété de recevoir les impressions colorées de toutes les parties du rayonnement lumineux, impressions colorées dont la teinte est semblable à celle des rayons lumineux actifs. La substance, qui est un sous-chlorure d'argent violet, découvert en 1848, en même temps qu'elle est impressionnée chimiquement, donne la reproduction des couleurs et permet de peindre avec la lumière; la peinture est passagère à la lumière, il est vrai, mais durable à l'obscurité; c'est une rétine minérale, si l'on peut se servir de cette expression, qui n'est impressionnée qu'entre les mêmes limites de réfrangibilité que la rétine, et donne l'intensité de l'action chimique produite d'après l'effet électrique accusé par le galvanomètre (*).

Voici les conditions les plus convenables pour obtenir les meilleurs effets :

1° Plus le galvanomètre à fil long est sensible, mieux les effets sont manifestes. Un galvanomètre dont le cadre a vingt-quatre mille tours de fil, construit par M. Rhumkorf, convient très-bien.

2° Le liquide doit être bon conducteur et ne pas attaquer la couche impressionnable. Un mélange de 2 grammes d'acide sulfurique pur à 66° pour 100 grammes d'eau a donné de bons résultats.

3° Les lames d'argent doivent être sans alliage, et de plus elles doivent recevoir chacune la même préparation. Il est nécessaire en effet que ces lames ne soient pas polarisées primitivement, et qu'ainsi elles soient aussi identiques que possible. Malgré ces précautions, on n'évite pas une polarisation primitive qui produit un courant faisant dévier l'aiguille dans un sens ou dans un autre, lorsque, après avoir monté l'appareil dans l'obscurité, on ferme pour la première fois le circuit.

On doit alors attacher les deux lames l'une avec l'autre après leur préparation, les maintenir plongées à l'obscurité dans le liquide

(*) *Annales de physique et de chimie*, 3e série, tome XXXII, page 176 et tome XLII, page 81.

conducteur, et attendre pendant six heures, douze heures, vingt-quatre heures, et même quelquefois quarante-huit heures, avant de commencer les opérations. Afin d'éviter ces pertes de temps, on a plusieurs paires de lames préparées, que l'on conserve dans l'eau acidulée, en contact l'une avec l'autre.

4° La préparation uniforme des lames est le point essentiel, et le procédé auquel on s'est arrêté consiste à faire arriver du chlore sur les lames d'argent à l'aide de la décomposition électro-chimique de l'eau acidulée par l'acide chlorhydrique. Le courant passe en même temps dans un appareil à décomposer l'eau, et donne, par la quantité d'hydrogène qui se produit, la proportion de chlore que l'on met sur une étendue déterminée de la surface des lames.

On emploie, pour fournir l'électricité nécessaire à cette opération, deux, trois ou quatre couples à acide nitrique, dont il sera question plus loin, et l'on attache ensemble les tiges des deux lames d'argent au fil conducteur positif. Les lames sont plongées dans une solution formée par un mélange d'eau et de $\frac{1}{8}$ ou $\frac{1}{10}$ en volume d'acide chlorhydrique ordinaire; elles doivent être polies et parfaitement décapées sur les deux faces, comme si l'on voulait obtenir une épreuve daguerrienne. Lorsque l'on a plongé dans le liquide une tige de platine en communication avec le pôle négatif des couples, le circuit est fermé, et, comme cela est décrit dans les mémoires cités plus haut, la lame d'argent noircit en prenant des teintes foncées correspondantes aux teintes des lames minces. On s'arrête au violet du quatrième ordre, ou bien à la proportion de 6, 8, à 7 centimètres cubes de chlore par décimètre carré de surface d'argent, et on lave à grande eau. Pour avoir une teinte homogène, on doit placer la tige négative de platine assez loin de la lame, et tourner sans cesse les lames d'argent en les tenant à la main par la tige.

Quand on juge que les deux lames ont reçu à peu près la même préparation, on les soumet à l'action de la chaleur (pendant une demi-heure à 100° à peu près), pour opérer un recuit ou plutôt une modification physique de façon à donner de bonnes impressions photo-chromatiques.

Dans ces conditions, lorsque l'actinomètre est dans une chambre obscure, et qu'on vient à faire tomber tout à coup les rayons solaires sur la surface entière de la lame antérieure (surface de vingt centimètres carrés), l'aiguille du multiplicateur est chassée violemment dans un sens que nous allons préciser. Si l'on intercepte la

lumière, l'aiguille revient peu à peu au zéro. L'action est tellement vive qu'il faut ne laisser impressionner qu'une très-petite portion de la lame par les rayons solaires directs pour avoir seulement 20° ou 30° du galvanomètre.

La lumière d'une bougie, placée à 1 décimètre de la cuve à eau, suffit pour faire dévier l'aiguille aimantée du galvanomètre de 12° à 15°.

La déviation, qui est constamment dans le même sens tant que les rayons lumineux frappent l'appareil, indique que la lame exposée au rayonnement prend l'électricité négative, et le liquide l'électricité positive. Si c'est l'autre lame qui est éclairée, le même effet se produit, mais l'aiguille se dévie en sens inverse. Le courant est inverse de celui qui a lieu lorsque les lames sont recouvertes d'une couche mince d'iode ou de brome; dans cette dernière circonstance, les rayons solaires donnent lieu à une décomposition, et la lame d'argent exposée à la lumière prend l'électricité positive.

Lorsque la lumière d'une bougie, la lumière diffuse, ou bien la lumière solaire impressionne la lame, on a une déviation plus ou moins forte, qui devient constante tant que la lumière conserve la même intensité, et que la surface est suffisamment impressionnable. Si l'on vient à intercepter la lumière, l'aiguille aimantée du galvanomètre revient au zéro, le dépasse un peu en sens inverse, par suite probablement d'un courant secondaire, mais elle reprend bientôt sa première position d'équilibre. Si la lumière a conservé son intensité primitive, et qu'on éclaire de nouveau la lame, alors l'effet électrique est le même que précédemment.

La déviation n'est constante, comme on le conçoit, que pendant le temps que la surface conserve la même impressionnabilité, et les résultats ne peuvent être comparables qu'autant qu'on remplit cette condition. On a pu, avec une lampe, maintenir un courant électrique sensiblement constant pendant trois heures; de faibles variations pouvant se rapporter aux changements d'intensité de la lampe, ou aux changements de température du liquide de la cuve à eau, il est indispensable dans les expériences de ce genre d'avoir soin de les éviter.

On a pu, avec cet instrument, étudier les différentes parties actives du spectre lumineux et des rayons qui ont traversé différents écrans ou qui ont subi la réflexion, la réfraction, etc. Mais l'examen des résultats obtenus nous entraînerait trop loin; nous nous sommes bornés à rapporter la disposition de l'appareil, à

montrer sur quel principe il est fondé, et à prouver qu'en faisant usage d'une des substances impressionnables les plus curieuses que l'on possède (le sous-chlorure d'argent violet), on a un appareil sensible à l'action de la lumière entre les mêmes limites de réfrangibilité que la rétine; peut-être permettra-t-il de mesurer l'intensité de la lumière par une méthode photométrique différente de celles qui sont usitées en optique (E. Becquerel).

Effets électriques produits dans les décompositions chimiques; évaporation. Il a été établi que, dans la combinaison d'un acide avec un alcali, le premier laisse dégager de l'électricité positive, le second de l'électricité négative. Dans les décompositions chimiques, les effets sont inverses. Pour le prouver, on procède de la manière suivante : on place sur un disque de métal, fixé à l'un des bouts d'une tige horizontale soudée au plateau inférieur d'un condensateur, une capsule de platine préalablement chauffée au rouge, dans laquelle on verse le liquide sur lequel on veut opérer. A la place de la capsule, on se sert avec plus d'avantage de lames épaisses de platine, légèrement creuses, qui conservent plus longtemps la chaleur communiquée. Si l'on jette quelques gouttes d'eau distillée sur la surface échauffée, on n'obtient aucun signe d'électricité; par conséquent l'évaporation seule n'est pas une cause du dégagement de cet agent. Quand l'eau renferme de la strontiane ou d'autres bases, la capsule se charge d'un excès d'électricité positive, et la vapeur prend l'électricité négative. Cet effet n'a lieu néanmoins qu'à l'instant où l'eau de combinaison s'échappe. Les effets sont inverses avec l'ammoniaque étendue d'eau. Dans cette dernière expérience, l'ammoniaque, se vaporisant plus facilement que l'eau, emporte avec elle l'électricité positive, et laisse à l'eau, et par suite à la capsule, l'électricité négative.

On voit d'après cela que, dans les décompositions chimiques, les effets électriques sont inverses de ceux qui ont lieu dans les combinaisons. Quand l'eau renferme un acide et que l'acide s'évapore, il emporte avec lui l'électricité négative; effet également inverse de celui que l'on obtient dans les combinaisons chimiques. On observe des effets bien marqués en opérant avec le bicarbonate de soude, que l'on projette dans la capsule chauffée au rouge; ce sel se décompose en laissant échapper de l'acide carbonique, la capsule possède alors un fort excès d'électricité positive, tandis que l'acide emporte avec lui l'électricité négative. Si l'on remplace le

bicarbonate par du sel marin, le sel décrépite, et l'eau interposée emporte avec elle l'électricité positive.

M. Peltier a précisé une circonstance indispensable pour la production du phénomène : si l'on verse quelques gouttes d'eau sur un morceau épais de platine, légèrement bombé, et dont on a élevé la température au moyen d'une lampe, il s'opère différents effets connus des physiciens relativement à la forme et au mouvement de l'eau, qui s'arrondit en sphère et qui, après diverses évolutions, finit par mouiller le platine, s'aplatir, et se vaporiser sans qu'il y ait d'électricité produite si l'eau est parfaitement pure et le morceau de platine très-propre. Avec une dissolution un peu étendue de sel marin, l'effet est le même la première fois; mais le sel abandonné par l'eau forme alors une couche légère sur le platine. Si l'on ajoute une nouvelle quantité d'eau, cette couche est reprise par celle-ci; dès l'instant que la goutte est diminuée de volume par suite de l'évaporation, elle devient presque opaque, et l'on voit une multitude de petits filets cristallins s'agiter dans l'intérieur : bientôt après on entend de petites décrépitations accompagnées de projections salines. Si le vase est en relation avec un électroscope condensateur ou avec l'appareil représenté figure 16 page 23, il devient alors négatif; mais si la température est assez abaissée pour permettre le mouillage, la décrépitation cesse, la goutte s'étend, l'eau se transforme en vapeur, et l'électricité s'échappe avec celle-ci. L'effet augmente à mesure que la couche saline est plus épaisse, et il est en rapport avec la décrépitation. Le sel qui décrépite sans fusion aqueuse produit le même effet.

Si l'on opère avec le nitrate d'ammoniaque, il y a fusion aqueuse, évaporation sans production d'électricité, puis décrépitation et dégagement d'électricité. Peltier avait conclu de là qu'il y a production d'électricité lors de la séparation des molécules d'eau combinées.

M. Gaugain a cherché à démontrer, au moyen des expériences suivantes, que le dégagement d'électricité dans la vaporisation de l'eau salée est dû à un frottement analogue à celui qui se produit dans la sortie de la vapeur humide d'une chaudière.

Quand on évapore de l'eau distillée dans un vase de platine, il ne se dégage pas d'électricité; mais, si l'on insuffle de l'air dans le creuset avec un soufflet en dirigeant le vent de manière à imprimer un mouvement rapide de rotation à l'eau disposée en globule, on

provoque alors une décrépitation assez vive à l'instant où le platine se mouille, et on obtient dans le creuset des signes d'électricité négative peu marqués, mais constants. En opérant avec de l'eau salée, comme Peltier l'avait fait, M. Gaugain a constaté que pendant la décrépitation, cause du dégagement de l'électricité, l'écartement des feuilles d'or de l'électroscope est graduel, et qu'il est plus fort qu'en faisant usage du petit condensateur de Volta. Il paraîtrait résulter des observations précédentes que l'effet électrique est dû à une action mécanique, à un frottement; mais est-ce à celui du sel ou de l'eau? Dans ce dernier cas, le phénomène serait donc analogue à celui qui se produit dans la machine d'Amstrong.

CHAPITRE IV.

Piles voltaïques.

Couples à courant constant. Nous avons parlé, dans le livre II, de la pile voltaïque et des piles à auges, à la Vollaston, de Muncke, et de la plupart des piles à un seul liquide généralement employées. Ces appareils, ainsi qu'on l'a dit, sont loin de donner des effets réguliers; mais, comme les piles sont d'un usage journalier, il était nécessaire d'exposer les différentes sources électriques, avant d'indiquer les perfectionnements apportés aux appareils producteurs d'électricité. Nous avons traité avec détails la production de l'électricité dans les actions mécaniques et physiques, mais jusqu'ici ces sources ne donnent que des quantités insuffisantes d'électricité pour les besoins des arts; c'est aux actions chimiques qu'il faut avoir recours.

Lorsqu'on fait usage d'une pile voltaïque à colonne, à auges, à la Vollaston, de Muncke, etc., montée comme il a été dit, pages 36 et suivantes, dans les premiers instants le courant est assez énergique, mais il diminue assez rapidement d'intensité; on ne peut donc songer à les employer quand il faut une action active et constante. Les causes suivantes diminuent l'intensité du courant : 1° le changement dans la composition du liquide conducteur et la variation

du travail chimique dans chaque couple; 2° les changements dans l'état de la surface des métaux, en y comprenant les dépôts d'oxydes, de gaz, etc., c'est-à-dire les effets de polarisation. En s'opposant à ces changements, on rend la pile constante; en outre, en augmentant la quantité d'action chimique produite et en opérant avec les liquides les meilleurs conducteurs, on augmente la quantité d'électricité dégagée.

Nous allons indiquer comment on est parvenu à obtenir les piles réunissant ces conditions, et quelles sont les formes actuellement en usage. Nous parlerons d'abord de chaque espèce de couple, qui est l'élément essentiel de la pile; ensuite nous indiquerons ce qui arrive quand on réunit les couples pour former les piles.

On évite les changements dans la composition des liquides conducteurs, en prenant un vase assez grand pour que, dans un temps donné, il y ait toujours à peu près la même quantité d'acide dans l'appareil; mais, quand la pile est un peu énergique, cela ne suffit pas pour assurer une force constante au couple: on a recours alors à un système de siphons qui renouvelle peu à peu le liquide. On doit remarquer qu'avec les couples tant soit peu énergiques, si l'on opère avec le même volume d'eau acidulée, on ne peut pas espérer avoir une intensité constante; elle ne peut être qu'à peu près constante; la plupart du temps, dans les arts cela suffit. Mais dans les recherches scientifiques, où il est indispensable de remplir rigoureusement cette condition, il faut avoir soin de maintenir le liquide à la même température et au même degré de concentration: sans cela l'intensité varierait rapidement; lorsque même cela est possible, on doit faire usage de couples peu énergiques, et l'on gagne alors en constance ce que l'on perd en intensité.

Zinc amalgamé. Pour maintenir les surfaces conductrices dans les mêmes conditions, il faut examiner les effets produits sur les deux métaux ou les deux conducteurs dont se compose le couple. Le zinc ordinaire dans l'eau acidulée donne, comme on le sait, du gaz hydrogène, même quand le circuit est fermé, ce qui indique que toute l'action chimique n'est pas employée dans le couple à la production de l'électricité; on y a substitué le zinc amalgamé, qui jouit de propriétés remarquables.

On amalgame le zinc en le décapant dans de l'eau acidulée par l'acide sulfurique, et étendant dessus du mercure avec un tampon; cependant, si les plaques sont épaisses, il faut amalgamer à plusieurs reprises et à différents jours d'intervalle, pour que le mercure pénètre profondément.

Une plaque de zinc ainsi amalgamé n'est pas attaquée, ou du moins l'est très-faiblement dans l'eau acidulée par l'acide sulfurique au milieu de laquelle on la plonge; tandis que, si on la touche avec un fil de cuivre ou de platine, elle est attaquée assez vivement : le zinc se dissout, et l'hydrogène se dégage sur le fil métallique. Cette différence dans les effets paraît provenir, comme on le verra plus loin, de ce que l'hydrogène, dans le premier cas, adhérant à la surface du métal, s'oppose à l'action ultérieure de l'acide, ce qui n'a pas lieu dans le second cas, l'hydrogène se dégageant sur le fil qui est en contact avec lui.

Si on plonge dans l'eau acidulée une lame de zinc ordinaire et une autre amalgamée, et qu'on les fasse communiquer au moyen d'un fil de cuivre, la lame amalgamée se comporte comme le zinc, et l'autre comme le cuivre dans un couple voltaïque ordinaire. Ainsi la lame de zinc amalgamé se conduit comme un métal plus vivement attaqué par l'eau acidulée que le zinc ordinaire.

Ce qui distingue les effets produits dans l'eau acidulée par une lame de zinc amalgamé en relation avec une lame de cuivre ou autre, de ceux qui ont lieu avec une lame de zinc et une lame de cuivre, c'est que l'action chimique, d'ordinaire violente et intense sur le zinc, est tranquille et uniforme sur les lames de zinc amalgamé. En outre, les pouvoirs électriques sont plus fortement exaltés.

Mais d'où peuvent donc provenir les propriétés du zinc amalgamé? Jusqu'à présent on n'a pu répondre d'une manière parfaitement satisfaisante à cette question. Cette différence a été attribuée à la présence du fer, du cadmium, qui se trouvent dans le zinc impur, lesquels constituent autant de couples voltaïques; il résulte de cette multiplicité d'actions qu'il y a beaucoup de zinc détruit, et que l'hydrogène se dégage en apparence sur la surface, bien qu'en réalité ce dégagement n'ait lieu qu'à la surface des particules métalliques étrangères : on conclut évidemment de là que ces particules servent en même temps à décharger l'électricité du zinc, et diminuent ainsi le pouvoir qu'a ce métal de produire un courant électrique, ce qui fait que l'intensité du courant qui passe dans le circuit métallique se trouve beaucoup affaiblie. En amalgamant la surface de zinc, on amène cette surface dans une condition uniforme qui détruit l'action des petits couples voltaïques. La difficulté est d'expliquer pourquoi la présence du mercure s'oppose à ce que le zinc soit attaqué tant qu'on ne le touche pas avec un fil de cuivre ou de

platine. Tout ce que l'on peut dire à cet égard, c'est que, la surface du zinc étant partout recouverte de mercure, une partie ne peut agir comme déchargeur vis-à-vis de l'autre; dès lors l'action chimique est suspendue. Un fait vient à l'appui de cette manière de voir, c'est que le zinc pur se comporte à peu près comme le zinc amalgamé dans l'eau acidulée.

Deux avantages importants résultent de l'emploi de zinc amalgamé. Le premier est que l'équivalent d'électricité s'obtient par l'oxydation d'une certaine quantité de zinc; on verra dans le tome II que l'on nomme équivalent d'électricité celui qui donne par décomposition un équivalent d'un composé chimique. Le second avantage est que le zinc n'est pas ou est peu attaqué, quand le circuit n'est pas fermé : nous disons peu attaqué, car, dans l'eau acidulée, il n'y a peut-être avec le zinc amalgamé qu'une action chimique faible. En outre de ces avantages, lors de l'action de l'eau acidulée le zinc seul est attaqué, le mercure ne l'étant pas, et la dépense en métal est par cela même moindre qu'avec du zinc ordinaire, puisqu'une même quantité de zinc amalgamé produit un plus fort courant que le zinc ordinaire.

Dépolarisation de l'électrode négative du couple. Dans les couples ordinaires, le cuivre qui sert de pôle négatif se polarise en se couvrant d'hydrogène, et de là résulte une augmentation de résistance et une diminution dans l'intensité des couples (voir page 201). Si la polarisation est constante, le couple peut conserver à peu près la même force, mais n'a pas le maximum d'effet. On a conseillé de substituer au cuivre, du cuivre platiné ou du platine platiné, qui, étant couvert d'une poudre noire de platine, permet au gaz hydrogène de se dégager. On forme ainsi un couple constant, mais ne donnant pas le maximum d'effet en raison de la cause que nous venons d'indiquer (couple de M. Smée). Il en est de même des autres dispositions analogues proposées pour laisser dégager l'hydrogène provenant de la décomposition de l'eau sans l'absorber.

On est conduit alors à plonger le conducteur négatif dans un autre liquide que celui qui attaque le zinc, liquide qui, par sa décomposition lors du passage du courant, empêche le dégagement de gaz hydrogène, ce gaz étant employé ou à réduire un sel métallique, ou bien à désoxyder une combinaison chimique, ainsi que cela a été dit page 199. On a alors les couples à deux liquides. Ce sont ces couples que l'un de nous, avant qu'on fît usage des cou-

ples à courant constant, a formés en 1829 et 1830, pour la reproduction de certaines substances minérales; quelques-uns peuvent fonctionner sans altération sensible pendant des mois, des années : nous en donnerons la description en traitant de l'électro-chimie (*).

Nous allons citer quelques-uns des couples en usage; ensuite nous indiquerons les tentatives que l'on a faites pour les améliorer, et les conditions à remplir pour augmenter leurs effets.

Couple à oxygène. Il repose sur les principes exposés précédemment, et montre l'action produite par la réaction des deux dissolutions l'une sur l'autre (Becquerel). On a déjà vu, page 189, un moyen d'observer le dégagement de l'électricité lors de la réaction de l'acide azotique et de la potasse; mais, pour avoir des effets plus énergiques, on peut disposer le couple comme il suit :

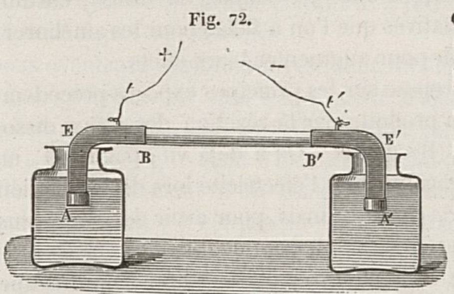
Il est composé de deux bocaux en verre, dont l'un renferme une solution de potasse caustique concentré, et l'autre de l'acide nitrique également concentré. Les deux vases communiquent ensemble par l'intermédiaire d'un tube de verre recourbé rempli de kaolin ou d'argile exempte de carbonate de chaux, et humectée d'une solution de sel marin. Dans le bocal où se trouve l'alcali plonge une lame d'or; dans l'autre, une lame d'or ou de platine. Si l'on met en communication les deux lames au moyen de fils d'or ou de platine, on a un courant assez énergique provenant de la réaction de l'acide sur l'eau et le sel marin d'une part, de la potasse de l'autre sur l'eau et le sel marin. La direction du courant montre que la lame plongée dans l'alcali prend l'électricité négative, et la lame plongée dans l'acide l'électricité positive; la permanence dans l'intensité du courant pendant plusieurs jours annonce que les surfaces des lames ne sont point polarisées; il est facile, en effet, de le prouver. Pendant que cet appareil fonctionne, le nitrate de potasse qui se forme à chaque instant est décomposé par l'action du courant; l'acide est transporté au pôle positif, qui est la lame plongeant dans la potasse, tandis que celle-ci est transportée sur la lame négative qui plonge dans l'acide. Or l'acide et l'alcali transportés, se trouvant en contact d'un côté avec la potasse, de l'autre avec un acide, se combinent immédiatement avec les liquides environnants, de sorte que les lames sont toujours parfaitement décapées; dès lors il ne peut y avoir aucun effet secondaire. Le courant ne diminue d'intensité que lorsque le nitrate de potasse qui se

(*) *Annales de physique et de chimie*, t. XLI, p. 1 et suiv. (1829).

forme peu à peu cristallise en assez grande quantité dans le tube de communication pour interrompre la circulation du courant; dans ce cas, il faut changer l'argile, inconvénient que l'on évite en disposant l'appareil de la manière suivante :

Le tube intermédiaire est formé d'un tube de verre BB'; ses deux bouts entrent avec frottement dans deux tubes recourbés en platine, comme l'indique la figure 72, dont les extrémités libres plongent dans les liquides. Sur les tubes en platine E, E' se trouvent deux petits appendices servant à établir la communication avec un galvanomètre, un voltamètre ou tout autre appareil : les deux extrémités du tube ne renferment qu'une petite quantité d'argile retenue au moyen d'une lame très-mince de platine, et percée de trous pour laisser passer le courant. Le reste du tube est rempli d'eau salée qu'on peut changer à volonté.

Fig. 72.



Si l'on veut donner plus d'énergie à l'appareil simple que nous avons décrit avant le modèle représenté figure 72, on substitue à la lame d'or qui se trouve dans la potasse, une lame de zinc amalgamé qui, étant attaquée par la solution de potasse, produit un courant dirigé dans le même sens que celui provenant de la réaction de l'acide sur l'alcali, d'où résulte un courant unique d'une intensité plus grande que celle qui provient de chacun d'eux.

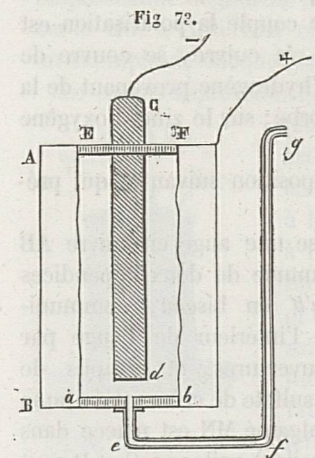
Ce couple, fondé sur l'action mutuelle de deux dissolutions, peut servir dans des recherches scientifiques; on a vu précédemment, page 188, que son nom de couple à oxygène lui a été donné à cause du dégagement de l'oxygène sur la lame formée d'un métal inoxydable plongeant dans la potasse.

Les dispositions que nous allons indiquer permettent d'obtenir des couples à courant constant qui sont aujourd'hui généralement adoptées suivant le but que l'on se propose.

Couples à sulfate de cuivre dans la cloison négative. M. Daniell, d'après les principes exposés précédemment, et qui se déduisent des expériences faites avec l'appareil à cloison décrit page 99, a donné au couple la disposition suivante :

AB est un cylindre de cuivre ouvert à sa partie supérieure et dont la partie inférieure est percée à son centre. Au fond est une portion de cylindre *ab* plus grande que l'ouverture, sur laquelle s'attache fortement une portion d'intestin de bœuf, qui s'attache aussi en EF correspondant à *ab*. Cette portion d'intestin forme un cylindre creux dans lequel plonge un morceau de zinc amalgamé *cd*. Alors, si l'on emploie différents couples, le cuivre AB, qui est une des lames du couple, est mis en rapport avec le zinc d'un autre couple, et l'on peut ainsi former une pile. A l'ouverture inférieure placée au centre de *ab* se trouve un tube en siphon *efg* recourbé en *g*, de telle sorte que, si on ajoute du liquide en EF dans le cylindre formé par l'intestin, il en coulera autant par *g*, si l'intérieur du sac membraneux est déjà rempli.

Fig 72.



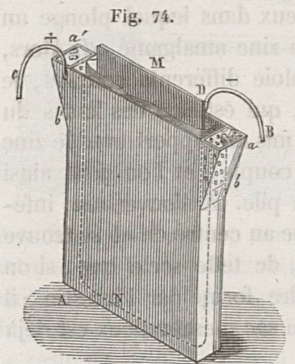
M. Daniell emploie, pour liquides, de l'eau acidulée par l'acide sulfurique dans la case zinc, et une solution saturée de sulfate de cuivre à l'extérieur du sac membraneux. Seulement l'eau acidulée tombe goutte à goutte dans la case zinc, et, à mesure qu'elle tombe, elle chasse dans le siphon l'eau acidulée chargée de sulfate de zinc, qui est plus pesante et qui diminuerait l'action de la pile. Des morceaux de sulfate de cuivre placés dans la solution de sulfate saturent cette solution au fur et à mesure que le sulfate dissous se décompose. Les couples ont 17 centimètres de hauteur sur 10 centimètres de diamètre, et l'intensité de l'action chimique reste sensiblement la même pendant plusieurs heures.

Un des avantages de cette pile et des piles analogues est qu'elle ne fonctionne pas quand le circuit est interrompu (voir zinc amalgamé, page 220); mais à peine est-il établi, le sulfate est décomposé, l'acide sulfurique se porte sur le zinc et concourt à produire le courant électrique, tandis que l'hydrogène de l'eau décomposée réduit le cuivre du sulfate sur la surface du cuivre du cylindre extérieur. Le courant électrique résulte donc, 1° de l'action de l'eau acidulée sur le zinc; 2° de l'action de l'acide sulfurique du sulfate de cuivre sur le même métal; 3° de l'action des deux dissolutions

l'une sur l'autre. Cette dernière étant la plus faible, le zinc se trouve être le pôle positif du couple. Dans ce couple la polarisation est détruite, puisque l'électrode négative, le cuivre, se couvre de cuivre et reste identique à elle-même, l'hydrogène provenant de la décomposition de l'eau étant alors absorbé; sur le zinc, l'oxygène est employé à oxyder le métal.

On peut donner à ces couples la disposition suivante, qui présente de très-bons résultats :

Fig. 74.



On dispose une auge en cuivre AB (fig. 74), munie de deux appendices creux *ab*, *a'b'* en biseau, communiquant avec l'intérieur de l'auge par plusieurs ouvertures, et remplis de cristaux de sulfate de cuivre. Une lame de zinc amalgamé MN est placée dans un sac en toile à voile; en C et D sont soudés deux appendices de cuivre destinés à transmettre l'électricité développée. Dans l'auge AB, on verse une dissolution de sulfate de cuivre, et dans le sac servant de diaphragme, de l'eau salée; le zinc et son diaphragme sont ensuite placés dans l'auge. En fermant le circuit, on a alors un courant énergique. Cet appareil permet de recueillir beaucoup plus d'électricité dégagée, parce que chaque face de la lame de zinc est en présence d'une surface de cuivre; c'est donc une des meilleures dispositions que l'on puisse adopter. Si l'on veut donner plus de force à l'action voltaïque, suivant les effets que l'on se propose d'obtenir, on plonge l'auge dans de l'eau dont on élève la température. A 60° ou 80°, la réaction de l'eau salée sur le zinc est telle que l'action décomposante du couple est énergique. Une pile de dix éléments de 60 centimètres de hauteur sur 40 de largeur, ainsi montée, a une action puissante.

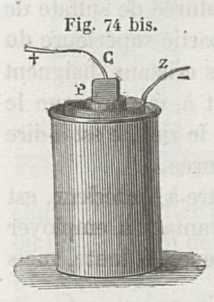
On ne peut employer cette disposition pour une action de longue durée, à moins de changer les dissolutions. Si l'on veut obtenir un courant persistant pendant plusieurs jours, rien n'est tel qu'une disposition permettant, à l'aide de siphons, de renouveler le liquide qui attaque le zinc, afin d'enlever continuellement le sulfate de zinc formé. Quant au sulfate de cuivre, en le maintenant toujours saturé avec des cristaux de ce sel, il peut fournir à l'action pendant longtemps.

On emploie très-fréquemment, dans ces couples, des diaphragmes

en porcelaine dégourdie, en baudruche ou en vessie. On peut placer le zinc à l'intérieur ou à l'extérieur. Nous donnerons ci-après un exemple de chaque disposition.

Le couple représenté fig. 74 bis a le zinc à l'extérieur. Un diaphragme poreux P, en porcelaine dégourdie, est placé à l'intérieur d'un vase en verre ou en terre. Une lame de cuivre C est mise à l'intérieur du diaphragme; le zinc *z* est à l'extérieur. On verse une dissolution saturée de sulfate de cuivre dans le diaphragme, et de l'eau légèrement acidulée ou de l'eau salée dans le vase où plonge le zinc, ou même mieux encore une dissolution de sulfate de zinc.

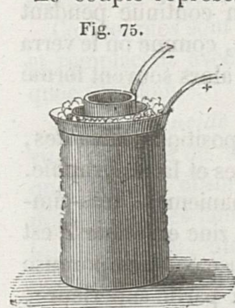
Fig. 74 bis.



Une des causes du défaut de constance de ces couples est l'incrustation des vases poreux; aussi, en employant comme liquide le sel marin et le sulfate de cuivre, cette incrustation s'opère rapidement; il vaut mieux employer alors le sulfate de cuivre et le sulfate de soude. Si l'on veut se servir du chlorure de sodium pour la case zinc, le chlorure de cuivre est préférable au sulfate de cuivre dans la case cuivre, mais le prix en est plus élevé (Despretz). On doit également observer que les vases poreux ont une résistance à la conductibilité assez grande; en augmentant donc la dimension des éléments, si on augmente l'épaisseur du diaphragme, l'intensité du couple s'accroît peu. Il résulte de là que, toutes choses égales d'ailleurs, des couples montés avec des diaphragmes en toile à voile ou en vessie sont plus énergiques qu'avec des vases en porcelaine dégourdie.

Le couple représenté ci-contre est formé d'une enveloppe en cuivre cylindrique, munie d'un appendice creux analogue à celui du couple (fig. 74). La dissolution de sulfate de cuivre est mise dans ce vase, et se trouve maintenue à saturation par les cristaux que l'on place dans l'appendice. Un diaphragme en vessie sépare le cylindre en cuivre du cylindre en zinc plongeant dans de l'eau salée, ou dans la dissolution de sulfate de zinc ou même dans de l'eau acidulée. Plus le zinc est attaqué lentement, plus l'action du couple est faible.

Fig. 75.



Quand on se sert de vessie ou de baudruche, comme diaphragme, on peut placer simplement un cylindre creux de cuivre, lesté avec du sable, dans une poche formée avec la vessie. Le tout est plongé dans un vase de verre et entouré d'un cylindre creux de zinc amalgamé; la poche en vessie est remplie d'eau saturée de sulfate de cuivre, et l'on met des cristaux de ce sel à la partie supérieure du cylindre dans une espèce de galerie à jour; ces cristaux baignent dans la solution, et la saturent continuellement à mesure que le sulfate est décomposé. Dans la case ou se trouve le zinc, c'est-à-dire dans le vase en verre, on met de l'eau salée saturée.

D'après cette disposition, le zinc, au lieu d'être à l'intérieur, est placé à l'extérieur. Quelquefois il y a plus d'avantage à employer l'eau salée que l'eau acidulée; l'action est un peu plus lente, mais aussi elle est constante pendant plus longtemps.

Lorsque les couples fonctionnent pendant longtemps, il se dépose du cuivre métallique sur le cuivre, et il est nécessaire de l'enlever. on a proposé d'employer, comme vases extérieurs de couples analogues à ceux de la figure 75, des vases en gutta-percha enduits intérieurement de plombagine. Cette surface intérieure se recouvre de cuivre au fur et à mesure que le couple fonctionne, et au bout d'un certain temps il suffit de fondre la gutta-percha pour retirer le cuivre déposé. On forme ensuite un nouveau vase, et l'on opère de même dans celui-ci.

Quand on n'a besoin que de couples de très-petite dimension, on peut en disposer de semblables aux précédents, mais en prenant des têtes de pipe comme diaphragmes poreux.

Plusieurs années avant que parût la pile de M. Daniell, et ainsi qu'on l'a déjà dit plus haut, l'un de nous avait employé une disposition analogue pour la reproduction électro-chimique de certaines substances minérales, qui exigeait une action continue pendant un laps de temps plus ou moins considérable, et, comme on le verra dans le deuxième volume, le diaphragme était alors souvent formé par un tampon d'argile.

Nous nous bornerons à citer encore les dispositions suivantes, utilisées aujourd'hui dans les horloges électriques et la télégraphie.

La première est d'un emploi facile et d'un maniement très-simple. C'est un couple à sulfate de cuivre, dont le zinc extérieur Z est placé dans un vase en verre ou en terre A. Le vase en terre poreuse P porte une petite plaque en gutta-percha à la partie supérieure, plaque percée de trous afin de laisser passer le liquide du dia-

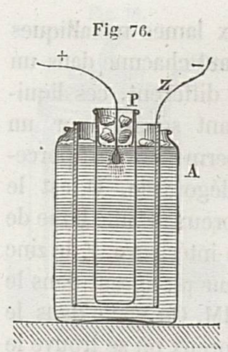


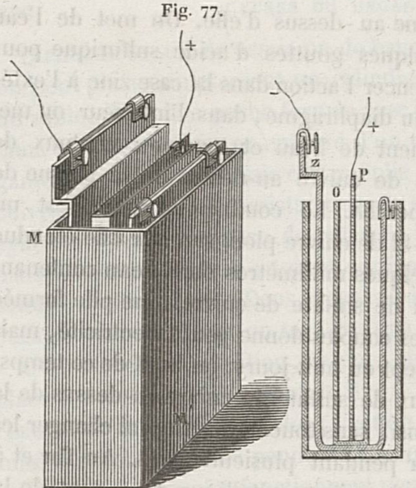
Fig 76.

phragme au-dessus d'elle. On met de l'eau et quelques gouttes d'acide sulfurique pour commencer l'action dans la case zinc à l'extérieur du diaphragme; dans l'intérieur on met également de l'eau et quelques cristaux de sulfate de cuivre au-dessus de la plaque de gutta-percha. Le conducteur positif est un simple fil de cuivre plongeant sur une étendue de quelques millimètres dans l'eau contenant un peu de sulfate de cuivre. Une pile formée avec ces couples donne peu d'électricité, mais elle peut marcher pendant sept ou huit jours; au bout de ce temps, on remet un ou deux cristaux de sulfate de cuivre au-dessus de la gutta-percha, et on peut ainsi, sans toucher au zinc ni changer les liquides, la faire fonctionner pendant plusieurs mois. Au fur et à mesure qu'elle fonctionne, le cuivre métallique provenant de la réduction du sulfate de cuivre se dépose au bout du fil; le dépôt s'allonge, et forme un cylindre de cuivre métallique que l'on enlève après plusieurs mois; on plonge alors de nouveau le fil dans l'eau du vase poreux, et l'action continue comme auparavant.

Souvent on substitue au fil positif et à la plaque en gutta-percha un conducteur en cuivre formé d'une tige mince passant au milieu d'un disque qui plonge dans le liquide à l'intérieur du diaphragme, mais de façon à ce que ce disque occupe la partie supérieure de la colonne liquide; ce disque remplace la plaque de gutta-percha, et sert à maintenir les cristaux de sulfate de cuivre qui se dissolvent continuellement dans le vase poreux. On les remplace avec facilité, et l'on enlève le cuivre déposé à leur partie inférieure. Quant aux autres parties du couple, savoir, le zinc extérieur, le vase et les liquides, ils sont les mêmes que dans l'appareil précédent.

Ces couples sont fort utilisés aujourd'hui pour les actions lentes, et remplacent avec avantage la pile de Bagration, qui sera indiquée plus loin.

Couples à acide azotique dans la cloison négative. Nous avons vu, à propos de la pile à oxygène, page 223, que l'acide azotique pouvait absorber l'hydrogène naissant, et par conséquent dépolariser les lames métalliques. M. Grove a basé sur ce principe le couple qui, modifié ainsi qu'on le verra plus loin, est le plus énergique de ceux qui sont employés aujourd'hui. Il se compose



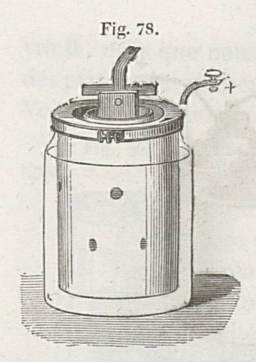
de deux lames métalliques plongeant chacune dans un liquide différent, ces liquides étant séparés par un vase perméable en porcelaine dégourdie. O est le vase poreux; P une lame de platine intérieure, Z le zinc extérieur plongeant dans le vase MM. On verse dans le vase poreux où se trouve le platine de l'acide azotique du commerce, et dans l'autre de l'eau acidulée par l'acide sulfurique; on varie la force de l'eau acidulée depuis $\frac{1}{50}$ jusqu'à $\frac{1}{10}$ d'acide; mais, dans ce dernier cas, il est nécessaire que le zinc soit bien amalgamé, sans cela il serait promptement détérioré. Le zinc est attaqué par l'acide sulfurique, et prend l'électricité négative; la lame de platine prend l'électricité positive; l'hydrogène qui s'y transporte forme des composés azotés moins oxydés, et même de l'azotate d'ammoniaque.

Les couples construits de cette manière sont très-énergiques, en raison de la conductibilité des liquides qui les composent; mais ils consomment de l'acide azotique et produisent des vapeurs nitreuses incommodant les personnes qui s'en servent continuellement; ils exigent, en outre, des lames de platine; il est vrai que c'est une première mise de fonds, car ce métal ne se détériore pas.

M. Bunsen a substitué au platine des conducteurs en charbon; ces couples fonctionnent de la même manière, et sont aussi énergiques, quoique exigeant moins de frais de premier établissement. On les fait actuellement de diverses dimensions; tantôt le zinc est à l'extérieur, tantôt il est à l'intérieur.

La figure 78 indique un modèle de couple à zinc intérieur. Les cylindres en charbon sont formés d'un mélange de coke et de matières bitumineuses recuites ensemble; un collier en cuivre les serre, et est soudé au conducteur qui fournit l'électricité positive du couple. Le cylindre, ou mieux la plaque de zinc amalgamé in-

Fig. 78.

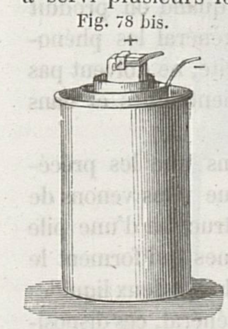


térieure est rivée simplement à une tige de cuivre bifurquée qui s'attache aux conducteurs des autres couples, et fournit l'électricité négative; cette lame de zinc plonge dans un vase poreux circulaire. Quant au vase extérieur, il est en verre afin que l'acide azotique ne puisse l'attaquer. Un des inconvénients qui se présentent dans l'emploi de ces couples est la détérioration prompte des colliers en cuivre; ils exigent aussi plus d'acide azotique que ceux dont la forme est représentée figure 78 bis, mais il ne se consomme toujours que la même quantité d'acide pour la même quantité d'électricité produite.

La figure ci-dessus indiquée représente une seconde lame de cuivre placée transversalement à la tige fixée au zinc; elle dépasse les bords du vase poreux, et s'oppose à ce que, la partie inférieure du zinc étant rongée, le conducteur ne s'enfonce dans l'eau acidulée de façon à ce que le cuivre baigne dans le liquide. Mais cette précaution est superflue quand on maintient le zinc en bon état.

Le zinc doit toujours être bien amalgamé, et plongé dans de l'eau acidulée par l'acide sulfurique au $\frac{1}{10}$. Quand à l'acide azotique, s'il a servi plusieurs fois, l'action va en s'affaiblissant.

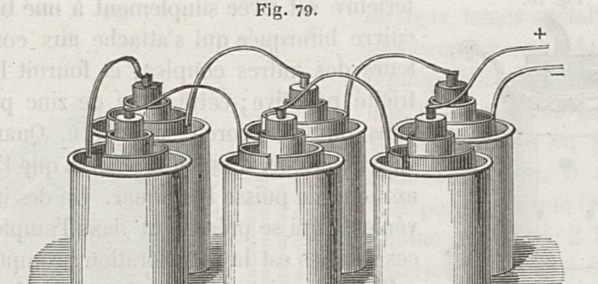
Fig. 78 bis.



La figure 78 bis est un modèle de couple à zinc extérieur. Le vase qui le contient est en faïence, puisqu'il renferme seulement de l'eau acidulée. Le charbon placé à l'intérieur du vase poreux cylindrique est un morceau de charbon de cornue plongeant dans l'acide azotique; pour établir la communication entre ce charbon et les conducteurs destinés à transmettre le courant, on applique sur sa surface, à l'aide d'une pince en cuivre, une lame de même métal bien décapée. Ce couple est jusqu'à présent le plus commode de ceux qui sont à charbon intérieur. Nous comparerons plus loin son intensité avec celle d'un couple à zinc intérieur de même dimension.

La pile de six éléments indiquée ci-après représente une autre disposition de couples à zinc extérieur et à charbon intérieur. Seulement les charbons sont cylindriques, et ils ont une ouverture

Fig. 79.



longitudinale qui les traverse dans leur partie centrale. Les conducteurs en cuivre sont terminés par un morceau de cuivre conique que l'on enfonce légèrement à la partie supérieure de ces ouvertures, afin d'établir les communications électriques.

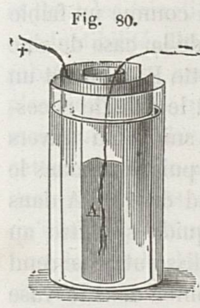
Mais les couples à acide nitrique, chargés de cette manière, ne sont pas constants : leur intensité augmente pendant quelque temps après qu'ils ont été chargés ; elle atteint un maximum, puis elle diminue graduellement. Un système de siphons renouvelant les liquides peut seul maintenir l'intensité constante entre certaines limites. Ainsi, ces couples, quoique beaucoup plus énergiques que ceux à sulfate de cuivre, et en usage quand on produit des phénomènes de lumière, de chaleur, et en général les phénomènes qui exigent une grande quantité d'électricité, ne doivent pas être préférés à ceux-ci dans les recherches scientifiques et dans les opérations de galvanoplastie.

Il est possible d'imaginer d'autres dispositions que les précédentes, et qui en réalité reviennent à celles que nous venons de décrire ; car la condition *sine qua non* de la construction d'une pile à courant constant est la séparation des deux lames qui forment le couple à l'aide d'une cloison perméable, et l'emploi de deux liquides différents dans lesquels plongent ces lames. En général, ces dispositions sont toutes bonnes ; il suffit de choisir pour chaque série d'expériences que l'on veut faire la pile qui convient le mieux, suivant l'intensité du courant, la quantité d'électricité dont on veut faire usage, et le temps pendant lequel on a besoin d'un courant constant en intensité.

On se sert également, dans certaines circonstances, de piles voltaïques à un seul liquide, dont nous n'avons pas parlé dans le li-

vre II, mais que nous devons indiquer pour terminer la description des principales piles en usage ; nous allons en décrire quelques-unes. Voici la disposition donnée par M. Wheastone :

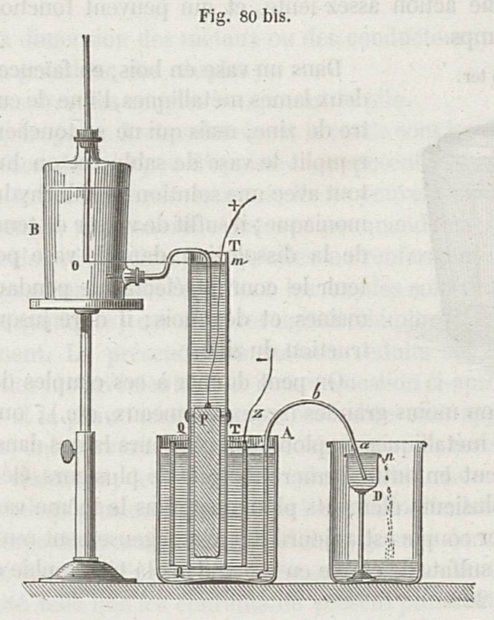
Fig. 80.



On prend un vase en terre poreuse, à demi cuite, pour qu'elle ne se délaye pas dans l'eau ; on y verse l'amalgame liquide de zinc A, et on plonge ce vase dans un bocal plein d'une solution saturée de sulfate de cuivre ; un fil de cuivre qui plonge dans l'amalgame communique l'électricité négative, tandis que l'électricité positive est transmise par une lame de cuivre plongeant dans le sulfate du même métal. C'est ici la réaction seule de l'acide sulfurique du sulfate sur le zinc de l'amalgame qui produit le courant électrique. On peut employer à la place de l'amalgame de zinc différents amalgames, et en particulier celui de potassium.

M. Froment a fait usage de couples d'un emploi facile :

Fig. 80 bis.

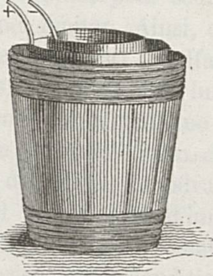


Chaque couple est formé d'un vase A contenant un diaphragme QQ' en terre poreuse, auquel est mastiqué un long tube en verre TT'. Un cylindre de zinc Z extérieur plonge dans une solution légère d'eau

acidulée. La même eau acidulée remplit en partie le diaphragme et le tube; une lame de plomb P, qui n'est pas attaquée par l'eau faiblement acidulée, sert d'électrode négative et fournit l'électricité positive au dehors. Ce couple fonctionnerait ainsi comme un faible couple ordinaire, mais la dissolution extérieure de la case de zinc se chargerait de sulfate de zinc. Le vase de Mariotte B, donnant un niveau constant *mo* au haut du tube TT', fournit le liquide nécessaire pour renouveler la dissolution; ce liquide suinte au travers du vase poreux, en vertu d'un excès de pression, puis vient dans le vase A. Un siphon *abc* amène le liquide du fond du vase A dans un petit vase D, et, au fur et à mesure que le liquide s'infiltre au travers du vase poreux Q, une même portion de dissolution se rend dans le vase D avec le niveau constant *n*, puis tombe dans le vase extérieur C. Il résulte de là que le liquide du couple est toujours renouvelé, et que c'est la portion de la dissolution chargée de sulfate de zinc dans le couple qui s'écoule au dehors.

M. le prince de Bagration a indiqué encore la construction de couples d'une action assez lente, et qui peuvent fonctionner pendant longtemps.

Fig. 80 ter.



Dans un vase en bois, en faïence, on place deux lames métalliques, l'une de cuivre, l'autre de zinc, mais qui ne se touchent pas. On remplit le vase de sable, et on humecte le tout avec une solution de chlorhydrate d'ammoniaque; il suffit de verser de temps à autre de la dissolution dans le vase pour maintenir le courant électrique pendant des semaines et des mois; il dure jusqu'à la destruction du zinc.

On peut donner à ces couples des dimensions plus ou moins grandes (seaux, tonneaux, etc.); on multiplie les surfaces métalliques en plongeant plusieurs lames dans le même vase. On peut en outre former une pile de plusieurs éléments, et même de plusieurs éléments plongeant dans le même vase.

Ce dernier couple est aujourd'hui avantageusement remplacé par le couple à sulfate de cuivre en usage dans la télégraphie électrique et décrit p. 229.

Nous venons de décrire les principales piles en usage; mais, malgré les résultats auxquels on est arrivé, certaines applications de l'électricité réclament des couples fournissant une très-grande

quantité d'électricité et au plus bas prix possible. On doit remarquer que, l'électricité de chaque couple provenant des actions chimiques intérieures, il faut chercher les corps qui coûtent le moins cher et dont les réactions s'opèrent dans les meilleures conditions de conductibilité. De là viennent les nombreuses tentatives faites pour substituer aux couples assez coûteux qui précèdent d'autres couples, tentatives qui n'ont pas encore été couronnées de succès, mais qui ne doivent pas arrêter les expérimentateurs engagés dans cette voie. Pour aider dans les recherches, nous nous occuperons des résultats obtenus dans les expériences entreprises pour trouver qu'elle est l'influence des différentes parties des couples à deux liquides sur le dégagement de l'électricité. Nous parlerons successivement :

1° Des diaphragmes;

2° De la nature du métal attaqué et du liquide dans lequel il plonge;

3° De la nature du conducteur négatif et du liquide dans lequel il plonge;

4° De la dimension des métaux ou des conducteurs;

5° De la grandeur des couples;

6° Du nombre des couples composant la pile.

Des diaphragmes. La baudruche et la vessie sont les diaphragmes qui, en raison de leur peu d'épaisseur, opposent le moins de résistance à la transmission du courant; ils ne peuvent servir que dans les expériences de recherches, et encore quand les solutions ne sont ni acides ni alcalines, ou qu'elles ne renferment aucuns sels d'or, d'argent ou de platine, dont les oxydes sont réduits par les matières organiques; car alors les agents chimiques les détruisent promptement. La présence des métaux réduits sur leur surface présente des inconvénients dont il sera question ci-après.

Le cuir et la peau tannés à sec, c'est-à-dire sans apprêt avec les corps gras, ont à la vérité les mêmes inconvénients; mais, comme ils sont plus résistants, leur durée est plus grande. Le cuir doit être plongé pendant plusieurs jours dans l'eau, afin d'enlever toutes les matières organiques solubles; quand il a séjourné dans l'eau salée, qu'il a été laissé à l'air et qu'on le fait servir de nouveau, il acquiert une densité telle que les courants ne passent plus. Cet effet est dû non-seulement à la cristallisation du sel marin dans les pores du cuir, mais encore à la formation d'un composé que l'eau chaude ne saurait dissoudre. D'après cela, il faut, toutes les fois que les

diaphragmes ont été plongés dans l'eau salée, les remettre tremper dans l'eau, afin d'éviter les effets signalés. On conçoit que l'on puisse donner de grandes dimensions à des diaphragmes de ce genre, en réunissant plusieurs peaux par une couture à points serrés, et en goudronnant les points de suture. De semblables diaphragmes bien préparés tiennent longtemps le liquide sans perte sensible; le seul inconvénient est l'épaisseur souvent un peu forte du cuir. La peau chamoisée et la peau en général sont trop perméables au liquide. On ne peut les employer que dans le cas où les deux liquides possèdent un très-faible degré d'endosmose. Le cuir préparé avec des corps gras ne peut convenir, parce qu'il s'oppose au passage du courant.

La toile à voile est un des meilleurs diaphragmes, surtout avec des dissolutions neutres n'ayant qu'un faible degré d'endosmose, car le courant n'est pas sensiblement arrêté, et l'on peut enlever facilement les cristaux de sel résultant de la réaction des deux dissolutions l'une sur l'autre. On peut donner aux diaphragmes de toile à voile la grandeur que l'on veut, ce qui est un avantage dans l'industrie; la couture doit être faite avec un fil enduit de poix.

Les planches de sapin ou de tout autre bois fibreux à tissu lâche ne peuvent être employées que lorsqu'elles n'ont pas plus de deux à trois millimètres d'épaisseur; mais il faut encore avoir soin d'enlever la séve et les matières résineuses en plongeant le bois pendant longtemps dans de l'eau bouillante alcalisée; ces diaphragmes ne peuvent servir que dans des cas assez bornés, car ils finissent par se cambrer lorsqu'ils sèchent.

Le kaolin ou l'argile exempte de carbonate de chaux est, sans contredit, une matière qui offre des avantages pour former des diaphragmes, attendu que, dans les recherches scientifiques, l'on peut leur donner une épaisseur de plusieurs centimètres, pourvu toutefois que l'argile soit imbibée d'un liquide bon conducteur, et qu'elle ne soit pas trop fortement tassée. Ces diaphragmes présentent les effets suivants quand ils ont une certaine épaisseur: 1° les effets d'endosmose sont nuls; 2° le mélange des dissolutions est tellement retardé, qu'il se passe souvent plusieurs mois avant qu'il se soit effectué. Il en résulte cependant quelquefois un inconvénient dont il faut se garantir : lorsque deux dissolutions réagissent l'une sur l'autre par l'intermédiaire de l'argile, s'il se forme une combinaison hydratée, alors l'argile perd l'eau qui servait à l'humecter, et acquiert une compacité telle, que le courant

finit par ne plus passer. C'est un motif pour placer dans le circuit une boussole destinée à faire connaître les variations du courant. Quand on reconnaît que l'argile est devenue trop compacte, il faut l'enlever et la remplacer. On évite d'employer de l'argile qui renferme des carbonates, parce que, quand un des liquides est acide, il se produit un dégagement d'acide carbonique qui vient porter le trouble dans l'appareil.

La porcelaine dégourdie est employée actuellement avec de grands avantages; mais elle offre plus de résistance que la terre demi-cuite et les creusets : seulement il faut avoir soin de laver les diaphragmes de temps à autre, afin d'enlever les sels qui, en cristallisant dans l'intérieur, finissent par faire éclater les parois. Sa résistance à la conductibilité augmente beaucoup avec l'épaisseur; si l'on pouvait avoir, surtout pour les piles à acide azotique, des diaphragmes assez solides, quoique peu épais, l'avantage que l'on en retirerait serait très-grand. On peut donner la même qualité aux creusets en leur faisant supporter un plus fort degré de cuisson.

Les creusets sont des diaphragmes très-commodes en raison de la facilité que l'on trouve à se les procurer; seulement, quand leurs parois sont trop épaisses, il faut diminuer cette épaisseur avec la lime.

Les diaphragmes en plâtre peuvent être employés, mais non avec des dissolutions renfermant de l'acide sulfurique libre, qui dissoudrait peu à peu le sulfate de chaux, en sorte que le diaphragme finirait par disparaître.

Le papier ou carton goudronné perméable au liquide est un bon diaphragme facile à préparer; le goudron n'est employé que pour empêcher le carton de se délayer dans l'eau.

En général, toute substance perméable aux liquides, qui n'est pas attaquée ou délayée par eux, peut servir à établir des cloisons poreuses; mais elle ne doit pas renfermer de matières conductrices de l'électricité, car il en résulterait, par suite du passage du courant, autant de centres d'actions décomposantes. En effet, toutes les fois qu'un corps solide conducteur se trouve dans un liquide traversé par un courant, l'extrémité de ce corps qui regarde le pôle positif devient un pôle négatif, et l'autre extrémité un pôle positif, de sorte que le corps constitue un élément voltaïque qui, en réagissant sur le liquide ambiant, opère la décomposition des substances qu'il tient en solution. Il faut éviter, d'après cela, que les diaphragmes ne contiennent du charbon, des pyrites et autres subs-

tances métalliques : c'est à cause de la présence de ces matières dans l'argile que des décompositions électro-chimiques s'opèrent quelquefois dans la croûte du globe. Les substances organiques ne présentent pas cet inconvénient, car elles ne sont conductrices que lorsqu'elles sont mouillées; néanmoins, quand quelques-unes de leurs parties sont très-denses, elles peuvent servir d'éléments décomposants.

Nature du métal attaqué et du liquide dans lequel il plonge habituellement. On fait usage de zinc parce qu'il s'attaque vivement dans l'eau acidulée par l'acide sulfurique et donne un produit très-soluble; un métal moins coûteux s'attaquant aussi vivement donnerait les mêmes effets. Le cadmium se comporte de même que le zinc; mais ce métal est rare, et il ne faut pas songer à son emploi.

On a pensé à utiliser la fonte et le fer comme métaux altérables. Mais ils s'attaquent mal dans l'eau acidulée, ne s'amalgament pas, et jusqu'ici on y a renoncé. Il est facile de montrer du reste que l'action électro-chimique du zinc est supérieure à celle du fer dans l'eau acidulée par l'acide sulfurique; si l'on plonge dans ce liquide deux lames, l'une de zinc, l'autre de fer, il en résulte un couple dans lequel le fer prend l'électricité positive, comme le ferait une lame de cuivre ou de platine, mais moins énergiquement.

On a proposé aussi de remplir un vase poreux de débris de zinc amalgamé, afin d'utiliser ces débris, et de s'en servir comme de lame positive; il est préférable de les mélanger avec du mercure, et d'en faire une pile à amalgame liquide, analogue à celle qui est représentée figure 80, page 233.

On emploie assez généralement, pour liquide conducteur, de l'eau acidulée par l'acide sulfurique; on pourrait utiliser également l'acide chlorhydrique. Dans la pile à sulfate de cuivre, comme l'acide sulfurique provenant du sulfate de cuivre peut attaquer le zinc, on a besoin d'employer seulement un liquide bon conducteur; on peut donc se servir, comme on l'a vu, d'eau salée, d'une dissolution de sulfate de zinc, de sulfate de soude, etc.

Nature du conducteur négatif et du liquide dans lequel il plonge. On a vu que l'énergie des couples dépend de la non-polarisation du conducteur négatif, et qu'il est nécessaire d'enlever le gaz hydrogène provenant de la décomposition de l'eau et qui s'y transporte continuellement. Nous avons dit que le sulfate de cuivre était généralement en usage, mais on pourrait aussi bien employer des sels métal-

liques réductibles; dans ce cas, les meilleurs conducteurs donneraient les meilleurs effets : si l'on pouvait, par exemple, faire usage de chlorure de platine, on aurait une pile très-puissante; mais on doit y renoncer, en raison du prix élevé de ce métal.

L'acide azotique, comme on l'a vu, produit des actions très-énergiques, mais les vapeurs qui s'en émanent et son prix élevé font que cette pile est d'un emploi coûteux. On a tenté de le remplacer par une dissolution oxydante. Parmi celles qu'on a proposées, nous citerons la dissolution de bichromate de potasse, dont on pourrait tirer très-bon parti. D'après M. Poggendorf, en prenant trois parties de bichromate de potasse, quatre d'acide sulfurique et dix-huit d'eau, on a dans les piles de Grove ou de Bunsen un effet aussi énergique qu'avec l'acide azotique; il se forme un alun de chrome dans la dissolution après la réduction complète de l'acide chromique. On pourrait alors, en reprenant les résidus, reformer du bichromate de potasse et ne pas perdre le sel de chrome.

Le conducteur négatif qui plonge dans ces liquides ne joue qu'un rôle passif; aussi peu importe que l'on ait du cuivre, du platine, du charbon selon les couples, pourvu que ce corps ne soit pas attaqué. L'énergie de la pile reste la même, quel que soit le conducteur, pourvu qu'il conduise bien. C'est pour cela que l'on n'a pas donné suite aux recherches de M. Schoenbein, qui proposait d'employer le fer inactif au lieu de charbon. On sait que le fer jouit de cette propriété remarquable de devenir inactif après avoir été plongé, sous certaines conditions, dans l'acide azotique; dans cet état, il peut fonctionner comme conducteur inoxydable. Ce résultat scientifique est fort curieux, mais il n'y a aucun avantage à l'utiliser ici.

Si l'on avait un corps solide qui fût relativement à l'hydrogène ce que le zinc est par rapport à l'oxygène, on formerait un couple d'une grande puissance. On a dû songer dès lors à utiliser les peroxydes métalliques qui, en couche mince, sont conducteurs de l'électricité. M. Delarive a montré qu'en tassant du peroxyde de plomb dans un diaphragme autour d'une lame de platine, l'hydrogène était absorbé, et il résultait un couple à un seul liquide, l'eau acidulée, lequel était aussi énergique que ceux dont il a été question précédemment.

Le peroxyde de manganèse pourrait servir également; mais, plongé dans une dissolution d'eau acidulée, il faut élever la température pour que la réaction se manifeste, car il est nécessaire d'amener le mélange près de l'état où l'oxygène doit commencer à

se dégager. D'après M. F. Leroux, l'action est assez énergique entre 70° et 80°, et ce n'est qu'en portant les couples à cette température que l'on pourrait se passer d'acide azotique. Il en est de même des couples à chlore, que l'on pourrait former en remplaçant l'acide azotique par une mélange d'acide chlorhydrique et de peroxyde de manganèse; une fois le chlore qui se produit dans les premiers instants dégagé, il faut chauffer vers 35°, pour que ce mélange dépolarise le conducteur négatif, et absorbe l'hydrogène que le courant du couple transporte sur le conducteur négatif, charbon ou platine. Cette élévation de température, comme on le sait, est un obstacle à l'emploi usuel de ces couples (F. Leroux).

Nous devons également placer ici quelques observations relatives à l'intervention de l'oxygène de l'air sur les couples voltaïques. Dès les premiers temps de la découverte de la pile, on s'aperçut que les couples ordinaires plongés dans l'air absorbaient de l'oxygène et que le courant tendait à s'arrêter quand il ne restait plus que de l'azote. Mais il résulte des observations récentes de M. Viard que l'effet est dû, non pas à l'action de l'oxygène sur le zinc, mais à une action analogue à celle qui se produit dans la pile à gaz (voir page 204); l'oxygène agit sur l'hydrogène de la lame négative pour la dépolariser. Dans les couples semblables à ceux de Volta, de Wollaston, l'action de l'oxygène est appréciable; dans ceux où la force électro-motrice est très-considérable, elle est nulle; en effet, dans ce cas, la dépolarisation est effectuée dans les couples eux-mêmes par d'autres substances que par l'oxygène.

Dimensions des éléments. Dans les couples dont il a été question, nous avons supposé que l'étendue des conducteurs était à peu près la même; mais leur étendue comparative peut avoir de l'influence, et, d'après Wollaston, l'étendue de la surface du cuivre ou négative devrait être double de celle du zinc ou du métal attaqué. Il serait à désirer que de nouvelles recherches fussent faites dans cette direction.

Quant à la grandeur des couples et à leur nombre pour former des piles, on ne pourra bien comprendre les résultats des observations faites jusqu'ici qu'après avoir indiqué les lois suivant lesquelles l'intensité augmente. Nous dirons, pour l'instant, que lorsqu'on a un long circuit à faire parcourir à l'électricité, l'étendue du couple n'y est pour rien; il faut un grand nombre d'éléments, car alors la tension électrique de la pile croît avec le nombre des éléments. Ainsi la tension s'obtient par le nombre des couples.

Quand on veut augmenter la quantité d'électricité produite par une pile, et obtenir de grandes étincelles, une forte chaleur, il faut augmenter la grandeur de chaque couple. La quantité d'électricité s'obtient par l'étendue des couples.

Théorie des piles voltaïques. Il existe deux théories fondées sur des bases tout à fait différentes et à l'aide desquelles on a voulu expliquer tous les phénomènes relatifs à la production de l'électricité dans les piles voltaïques. L'une repose sur un principe métaphysique, savoir les effets électriques produits au contact des corps, abstraction faite de toute influence chimique : principe dont l'existence ne saurait être constatée d'une manière exempte de toute objection ; l'autre s'appuie sur les effets électriques produits dans les actions chimiques dont l'existence ne peut être mise en doute et que nous avons adoptée dans cet ouvrage. Nous allons montrer comment cette dernière théorie conduit à la formule de la pile voltaïque donnée pour la première fois par M. Ohm en 1827, démontrée par M. Pouillet à l'aide d'expériences faites avec les courants thermo-électriques, et vérifiée par les travaux exécutés depuis cette époque, comme on va le voir ci-après (Fechner, Jacoby, Lenz, Poggendorf, Wheastone, Daniell, Delarive, Despretz, Becquerel, E. Becquerel, etc...).

On sait que, lorsque les deux électricités sont séparées l'une de l'autre par le seul fait d'une action chimique entre deux corps, elles tendent toujours à se recomposer directement sur la surface de contact pour former de l'électricité naturelle, sauf un léger excès qui reste à l'état de liberté, ou plutôt à l'état d'équilibre sur chacune des deux surfaces d'action : le corps qui se comporte comme acide rend libre de l'électricité positive ; celui qui se comporte comme alcali, de l'électricité négative. Si les deux corps sont mis en communication par l'intermédiaire de conducteurs, la recomposition s'effectue au moyen de ces derniers. Cette recomposition s'opère suivant la tension des deux électricités, la nature et la conductibilité des conducteurs; la très-petite quantité qui reste libre sur chacun des corps en présence, quand le circuit n'est pas fermé, constitue sa tension. C'est cette quantité qui échappe à la recomposition pendant le temps que s'effectue le dégagement de l'électricité. On arrive ainsi à une limite qui est constante tant que les conditions de l'action chimique ne sont pas changées.

Il se passe des effets semblables dans une pile composée de la réunion de plusieurs couples; car, lorsque les deux électricités se dé-

gagent dans les réactions chimiques et qu'elles sont à l'état de liberté, elles se répandent immédiatement, du moins les quantités libres, dans les corps qui communiquent entre eux, sans perte sensible ; le phénomène se passe donc comme si à l'instant de ce dégagement il y avait une force d'impulsion chassant au loin les deux électricités qui jouissent alors chacune des propriétés que nous leur connaissons, c'est-à-dire qu'elles tendent à former de l'électricité naturelle en suivant tous les conducteurs qui se présentent sur leur passage.

La force en vertu de laquelle ce dégagement d'électricité a lieu a reçu le nom de force *électro-motrice* dans la théorie du contact. Nous nous servirons de cette dénomination qui a été généralement adoptée, mais en n'y attachant pas la même signification. Nous entendons par force électro-motrice cette force en vertu de laquelle deux corps en contact se constituent dans deux états électriques différents par les actions des affinités, de la chaleur, etc...

Formule des piles voltaïques. Supposons que, dans un couple à courant constant, on désigne par E l'exès de tension des électricités résultant des quantités qui restent en présence quand le circuit est ouvert, c'est-à-dire la force électro-motrice du couple ; quand on fermera le circuit, la circulation de l'électricité aura lieu en raison de $+$E et de $-$E. Or, la quantité qui passera dans un temps donné dans le circuit, et qui constitue l'intensité du courant, dépendra de sa résistance à la conductibilité et sera en raison inverse de cette résistance. Si on désigne l'intensité du courant par I, et la résistance du courant par R, on aura :

$$(1)\ I = \frac{E}{R}.$$

R est aussi ce qu'on appelle la longueur réduite du couple, c'est-à-dire la longueur d'un fil métallique normal équivalent en conductibilité au circuit. (Voir page 78 et suivantes.)

Si, au lieu d'un couple, on considère une pile formée de n éléments, les effets seront les mêmes, la résistance totale sera nR ; l'excès de tension électrique sera nE, d'après ce que l'on a dit plus haut, et on aura pour l'intensité du courant :

$$(2)\ I = \frac{nE}{nR}.$$

Telle est la formule fondamentale des piles voltaïques. On l'exprime en disant : « L'intensité d'un courant électrique dans une « pile voltaïque est égale à la somme des forces électro-motrices « développées dans chaque couple, divisée par la somme des résis-

« tances de ces couples. » On doit entendre par somme des forces électro-motrices celle qui résulte de l'ensemble de toutes les réactions chimiques qui s'opèrent quand le circuit de la pile est fermé.

Si l'on joint les deux pôles d'une pile de n éléments par un fil ou un conducteur d'une résistance r, la résistance du circuit augmentera et sera $n\mathrm{R}+r$; alors l'intensité du courant diminuera comme on l'a vu page 79, et on aura (*) :

$$(3)\ \mathrm{I}=\frac{n\mathrm{E}}{n\mathrm{R}+r}.$$

Si l'on cherche à vérifier cette formule par l'expérience, et à déterminer par l'interposition d'un rhéostat, les valeurs de R et de E, en faisant varier les intensités du courant, on ne trouve pas des nombres parfaitement constants, ou, en d'autres termes, la force électro-motrice et la résistance de chaque couple ne sont pas des quantités constantes. Il est facile de se rendre compte des variations que l'on observe : on a dit, pages 102 et suivantes, que lorsqu'un courant traverse un circuit mixte composé de métaux et de liquides, le coefficient de résistance de ce circuit ne peut être considéré comme constant dans le cours d'une expérience, et qu'il se produit aux changements de conducteurs une résistance due non-seulement au passage du courant dans un sens ou dans l'autre, mais encore à la polarisation des lames; la résistance totale qui en résulte, et qui porte le nom de perte au passage, est fonction de l'intensité du courant et ne peut être évaluée approximativement que par une formule d'interpolation. Or, quand on fait varier la longueur du circuit r qui entre dans l'expression de l'intensité du couple, l'intensité du courant I diminue, et, les résistances au passage étant modifiées, les autres termes doivent en être affectés; ils ne peuvent donc pas être considérés comme constants.

(*) Les valeurs R et r sont ce que nous avons appelé, page 80, les *résistances relatives* que les corps présentent au passage de l'électricité. Quand on les détermine à l'aide des formules précédentes, on obtient les coefficients de résistance, ou bien les résistances comparées à celles du fil normal dont on fait usage, et cela indépendamment de l'intensité du courant. Quant aux résistances absolues que les conducteurs présentent au passage de l'électricité, elles sont fonction de l'intensité du courant, et, par analogie avec les effets observés dans les autres phénomènes physiques, on peut les considérer comme proportionnelles au carré de l'intensité du courant. Mais dans les déterminations numériques comparées, et ainsi que nous l'avons fait dans le livre II, cette considération n'est pas nécessaire à introduire, et on se borne à représenter les rapports des résistances comme constants pour les mêmes substances, indépendamment de l'intensité du courant.

Ainsi la formule précédente ne doit pas être regardée comme l'expression exacte de la loi du dégagement de l'électricité dans la pile voltaïque, à moins d'y introduire les quantités dont il vient d'être question. Dans le cas des piles thermo-électriques et de circuits tout métalliques, cette loi s'éloigne peu de la vérité, les pertes au passage étant peu appréciables devant les résistances des conducteurs. Mais avec des piles formées de circuits mixtes liquides et solides, et surtout avec les piles qui ne sont pas constantes, quand on fait varier l'intensité du courant dans de grandes limites, les valeurs de E et de R ne restent pas les mêmes.

D'après ce que l'on a vu page 105, si l'on ajoute à la résistance du circuit r une expression de la forme $\frac{B}{I} - \frac{C}{I^2}$, la formule que l'on en déduira représentera les déterminations numériques entre les limites des expériences; on trouve alors en introduisant cette expression à la suite de r dans la formule (3), et en réduisant :

$$(4)\quad I = \frac{nE - B + \frac{C}{I}}{nR + r}.$$

Le terme $\frac{C}{I}$ est toujours plus petit que B, mais n'est pas négligeable. On voit que les termes qui proviennent de l'introduction des résistances au passage, dans le calcul, remontent au numérateur de la formule, et peuvent être considérés comme diminuant la force électro-motrice de la pile. On peut donc les considérer comme des forces électro-motrices produites aux changements des conducteurs.

Quelquefois on fait entrer dans l'expression de la formule l'étendue des plaques métalliques des couples, l'épaisseur des dissolutions, des diaphragmes qui les séparent, etc.; mais, d'après ce que nous venons de voir, on ne peut obtenir une formule exacte, en raison des variations qui se produisent à la surface des conducteurs. On doit se borner aux indications que nous avons données.

Supposons que l'on considère la formule (3) comme l'expression approchée de la loi du dégagement de l'électricité dans les piles voltaïques; on en déduit facilement plusieurs conséquences importantes :

1° Un couple est d'autant plus énergique que sa force électromotrice est plus grande et que sa résistance est moindre. Ainsi en cherchant les conditions dans lesquelles ces deux quantités peuvent être augmentées ou diminuées, on obtiendra des piles plus énergiques.

2° Un couple donne autant d'électricité qu'une pile d'un nombre n d'éléments quand il n'y pas de résistance additionnelle. En effet, les formules (1) et (2) donnent la même valeur pour I.

3° Si la résistance additionnelle r croît proportionnellement au nombre des éléments que l'on ajoute, alors l'intensité électrique reste la même, quel que soit le nombre de couples.

En effet, avec un couple on a $I = \frac{E}{R + r}$; avec n couples la résistance additionnelle étant nr par hypothèse, on aura, d'après la formule (3), $I = \frac{nE}{nR + nr}$, c'est-à-dire $I = \frac{E}{R + r}$.

4° L'étendue d'un couple augmente *la quantité d'électricité*, car dans la formule (1), quand le couple a une plus grande étendue, E est plus grand et R, la résistance, est plus petit.

5° Le nombre des éléments de la pile augmente *la tension*, et permet à l'électricité de franchir une plus grande résistance. On peut mettre, en effet, la formule (3) sous la forme $I = \frac{E}{R + \frac{r}{n}}$; on voit alors que, à mesure que n croît, $\frac{r}{n}$ diminue, et l'intensité I augmente.

Courants dérivés. Lorsqu'on met en communication les deux extrémités d'une pile voltaïque à l'aide de deux fils conducteurs, le courant se partage dans les deux fils en raison de leur conductibilité, c'est-à-dire en raison inverse des résistances ou de leurs longueurs réduites ; ainsi les résistances étant représentées par a et b, les quantités d'électricité qui passent par les deux fils sont entre elles comme $b : a$ (Pouillet).

Il est facile de calculer l'intensité du courant qui traverse chaque fil. En effet, la réunion des deux fils rend la résistance additionnelle moindre, la quantité d'électricité qui circule dans la réunion des deux fils est donc plus considérable; or, la résistance de ces deux fils réunis est $\frac{ab}{a + b}$ (*), et l'intensité sera dans tout le circuit et dans chaque fil :

(*) On peut le démontrer comme il suit : Considérons un fil d'une même nature et d'une section variable, dont la longueur est l, et la résistance sous l'unité de section et de longueur r. Les sections s et s', nécessaires pour que les fils aient les résistances a et b, seront déterminées par les équations :

$$a = \frac{rl}{s} \text{ et } b = \frac{rl}{s'}.$$

Or les deux fils réunis parallèlement, ayant même longueur, équivaudront à un fil

Dans le circuit total, $I = \frac{nE}{nR + \frac{ab}{a+b}}$,

Dans le fil dont la résistance est a, $I' = \frac{nEb}{nR(a+b)+ab}$,

Dans le fil dont la résistance est b, $I'' = \frac{nEa}{nR(a+b)+ab}$;

Et l'on a $I' + I'' = I$.

Détermination de la force électro-motrice et de la résistance des couples voltaïques. La formule des piles voltaïques renfermant seulement l'intensité du courant, la force électro-motrice et les résistances du circuit, il semble facile de pouvoir en déduire les rapports des forces électro-motrices et des résistances des différents couples; aussi plusieurs physiciens se sont-ils occupés de cette détermination (Fechner, Wheastone, Joule, etc.). Mais, d'après les explications données plus haut, la formule (3) devant être modifiée pour représenter les intensités du courant quand on fait varier les résistances du circuit dans de grandes limites, les nombres que l'on peut en déduire pour représenter E et R dans chaque couple ne doivent pas être constants. Il serait nécessaire que l'on pût indiquer dans chaque cas l'intensité du courant sur lequel on opère. Nous citerons néanmoins quelques-uns des résultats obtenus pour montrer entre quelles limites sont comprises les valeurs comparées des forces électro-motrices de différents couples.

M. Wheastone, en partant de la formule (3), a opéré comme il suit : soit deux couples dont les forces électro-motrices sont E, E', et les résistances R et R'. On met dans chaque circuit successivement un galvanomètre et un rhéostat (voir page 80) capable de rendre plus grande à volonté la résistance en augmentant ou diminuant la longueur d'un fil normal. L'intensité du courant évaluée par la déviation de l'aiguille aimantée sera dans les deux cas :

$$I = \frac{E}{R+r}, \quad I' = \frac{E'}{R'+r'},$$

r et r' étant les résistances du fil de rhéostat interposé dans les deux circuits.

de même longueur et dont la section serait $s + s'$, c'est-à-dire, d'après les deux équations précédentes $\frac{rl}{a} + \frac{rl}{b}$; la résistance de ce nouveau fil ou de la réunion des fils dont les résistances sont a et b est donc :

$$\frac{rl}{s+s'} = \frac{rl}{\frac{rl}{a}+\frac{rl}{b}} = \frac{ab}{a+b}.$$

Si l'on fait varier les résistances r et r' de façon que les déviations de l'aiguille aimantée soient les mêmes, on aura $I = I'$, et de là :

$$\frac{E}{E'} = \frac{R + r}{R' + r'}.$$

Or, comme on peut déterminer avec le rhéostat les résistances R, R', et les résistances additionnelles r et r' comprenant le fil du rhéostat et celui du galvanomètre, on aura le rapport $\frac{E}{E'}$ des forces électro-motrices de chaque couple.

M. Wheastone a préféré introduire dans chaque couple amené à donner la même déviation une nouvelle résistance additionnelle avec le rhéostat, afin que la déviation moindre qui en résulte soit encore la même pour les deux couples ; il est facile de démontrer que les deux résistances additionnelles a et b introduites dans les deux circonstances sont également proportionnelles aux forces électro-motrices des couples.

Les nombres suivants sont exprimés en fonction du nombre de tours dont on tourne la roue du rhéostat et se rapportent aux couples dont la forme a été indiquée page 233.

Amalgame de zinc,	sulfate de cuivre, cuivre	30
Id.,	acide sulfurique étendu, cuivre	20
Id.,	chlorure de platine, platine	40
Id.,	acide sulfurique étendu, platine	27
Amalgame de potassium,	sulfate de zinc, zinc	29
Id.	sulfate de cuivre, cuivre	59
Id.	chlorure de platine, platine	69
Amalgame de zinc,	acide sulfur. étendu, peroxyde de plomb	68
Id.,	de potassium, acide sulfurique étendu, peroxyde de plomb	98
Id.,	de zinc, acide sulfurique étendu, peroxyde de manganèse	54
Id.,	de potassium, acide sulfurique étendu, peroxyde de manganèse	84

Les résultats précédents groupés différemment montrent qu'avec trois métaux, la force électro-motrice due aux deux métaux extrêmes est équivalente à la somme des forces électriques de deux éléments formés de métaux consécutifs ; en effet :

Amalgame de potassium,	sulfate de zinc, amalgame de zinc. .	29
Id.,	de zinc, sulfate de cuivre, cuivre.	30
Id.,	de potassium, sulfate de cuivre, cuivre. (Somme).	59
Id.,	de potassium, sulfate de zinc, amalgame de zinc.	29
Id.,	de zinc, chlorure de platine, platine.	40
Id.,	de potassium, chlorure de platine, platine (Somme).	69

M. J. Regnault a proposé une autre méthode pour faire cette détermination : il emploie une pile composée d'un nombre variable de couples à l'aide de laquelle il annule le courant électrique du couple dont il cherche le pouvoir électro-moteur en les opposant pôle à pôle et introduisant un galvanomètre dans le circuit (*).

Nous donnons ci-après quelques déterminations faites avec des couples usuels en introduisant dans le circuit des fils métalliques d'un diamètre d'un millimètre, et variable de 0 à 100 mètres de longueur. Ces couples ont la forme de ceux qui ont été représentés page 231 (E. Becquerel) :

(*) Soit n le nombre de couples de résistance r et d'un pouvoir électro-moteur e employés pour produire le même effet qu'un couple d'une résistance R et d'un pouvoir électro-moteur E. Comme l'intensité de chaque courant dirigé en sens inverse est, d'après la formule (3) :

$$\frac{ne}{nr + \mathrm{R}} \quad \text{et} \quad \frac{\mathrm{E}}{nr + \mathrm{R}}.$$

On aura $ne = \mathrm{E}$. Donc le nombre n pourra servir à comparer la puissance électromotrice du couple.

Les couples pris pour unités sont des couples thermo-électriques et des couples à courants constants à deux liquides peu énergiques, sulfate de zinc, sulfate de cadmium, et ayant pour métaux le zinc et le cadmium.

Couples.		
Zinc amalgamé.	Cuivre.	165
Sulfate de zinc.	Sulfate de cuivre.	
Zinc amalgamé.	Platine.	310
Acide sulfurique $\begin{pmatrix}SO^3 & HO\\ 10 & Aq\end{pmatrix}$.	Acide azotique.	
Amalgame liquide de potassium. . . . . $\begin{pmatrix}\text{1 potassium}\\ \text{150 mercure}\end{pmatrix}$	Platine.	417
Chlorure de sodium.	Chlorure de platine.	
Zinc amalgamé.	Peroxyde de plomb en lames galvaniques.	466
Hydrate de potasse.	Acide sulfurique $\begin{pmatrix}SO^3 & HO\\ 10 & Aq\end{pmatrix}$	

COUPLES. VASES POREUX CYLINDRIQUES.			RÉSISTANCE du couple R en fonction d'un fil de cuivre de 1 mill. de diamètre.	FORCE électro-motrice comparée E.	VALEUR de $\frac{E}{R}$
DIMENSIONS.	INTÉRIEUR.	EXTÉRIEUR.			
Hauteur........$210^{\text{mill.}}$ Diamètre intérieur 60	Acide azotique à 36°, hauteur du liquide, $200^{\text{mill.}}$. Surface totale du charbon plongé, $3^{\text{décim.}}$ carrés.	Eau acidulée par l'acide sulfurique au $\frac{1}{10}$, hauteur du liquide, $200^{\text{mill.}}$. Surface intérieure du zinc annulaire, $5^{\text{déc.}}$ carrés.	mètres. 7,44	100	13,44
Id.	Eau saturée de sulfate de cuivre, hauteur du liquide, $200^{\text{mill.}}$. Surface totale du cuivre plongé, $2^{\text{déc.}}$,5 carrés.	Id.	13,58	58,4	4,30
Hauteur.........$125^{\text{mill.}}$ Diamètre intérieur 50	Acide azotique à 36°, hauteur du liquide, $105^{\text{mill.}}$. Surface totale du cuivre plongé, $0^{\text{décim.}}$,85 carrés.	Eau acidulée par l'acide sulfurique au $\frac{1}{10}$. Surface extérieur du zinc annulaire plongé, $1^{\text{déc.}}$,80 carrés.	9,59	102	10,62
Id.	Eau acidulée par l'acide sulfurique au $\frac{1}{10}$, hauteur du liquide, $105^{\text{mill.}}$ Surface totale du zinc plongé, $0^{\text{déc.}}$,85 carrés.	Acide azotique 36°, hauteur du liquide, $105^{\text{mill.}}$. Surface intérieure du charbon plongé, $1^{\text{déc.}}$,80 carrés.	9,34	97,8	10,47

Les détails dans lesquels nous sommes entrés précédemment montrent que ces déterminations diverses n'ont rien d'absolu, puisqu'elles ont été faites dans la supposition de la formule (3), et que la force électro-motrice n'est pas seulement produite à la surface de séparation du zinc et de l'eau acidulée, mais résulte de l'ensemble des réactions qui ont lieu dans l'intérieur du couple, et qui sont fonctions de l'intensité du courant. On voit que ce sujet demande à être de nouveau étudié attentivement.

A propos des piles voltaïques, nous ne devons pas omettre de mentionner un résultat important cité déjà en parlant du zinc amalgamé, et sur lequel nous reviendrons dans le second volume en parlant des actions chimiques dues à l'électricité. L'action chimique principale donnant lieu au courant est l'oxydation du zinc et sa dissolution dans l'eau acidulée. Or il résulte de l'ensemble des effets observés que l'on recueille toute l'électricité que produit un poids donné de zinc amalgamé ; seulement la disposition des appareils et la résistance des circuits font que cette quantité d'électricité est émise plus ou moins vite dans un temps donné.

Considération théorique relative au dégagement de l'électricité. En terminant la description des différentes sources physiques et chimiques d'électricité, nous devons faire remarquer que la quantité d'électricité obtenue est proportionnelle à l'action mise en jeu pour la produire. Ainsi, une quantité donnée de travail moléculaire mécanique, physique ou chimique, ne peut produire tout au plus qu'une somme d'électricité déterminée qui lui est équivalente. En rapprochant cette observation des résultats qui seront développés dans le livre IV à propos des phénomènes calorifiques, et dans les deux autres volumes de cet ouvrage, on verra qu'elle vient appuyer l'idée théorique assez généralement adoptée aujourd'hui de l'équivalence des forces physiques. Ces considérations sont favorables à l'hypothèse qui attribue les phénomènes électriques à un mouvement vibratoire communiqué à un milieu pénétrant tous les corps, mouvement que l'on peut déterminer par les différents moyens mécaniques, physiques ou chimiques que nous avons indiqués dans ce livre.

CHAPITRE V.

Du dégagement de l'électricité dans les actions physiologiques.

Des effets électriques observés dans les végétaux. Les causes qui dégagent de l'électricité dans les corps organisés, sous l'empire de

la vie ou lorsque celle-ci a cessé depuis peu de temps, sont physiques, chimiques et peut-être organiques ; dans ce dernier cas, elles se rattacheraient à certains fonctions vitales qui n'ont pas encore été nettement définies.

Les corps organisés, lorsqu'ils appartiennent au règne animal ou au règne végétal, sont composés, les premiers, de parties osseuses, tendineuses, membraneuses, charnues, etc., humectées ou remplies de liquides qui les rendent plus ou moins conductrices de l'électricité; les seconds, de fibres, de vaisseaux, de tiges contenant également des liquides, à la faveur desquels ils sont conducteurs. Ces liquides, en raison de leur faculté conductrice exclusive (les parties solides sans eau en étant privées), jouent donc le rôle principal dans la production des effets électriques observés dans les corps organisés, lors même que l'action vitale interviendrait dans quelques cas. Ces liquides, considérés deux à deux, donnent lieu nécessairement, dans leur contact mutuel, par suite des réactions qui en résultent, à des effets électriques rendus sensibles non-seulement avec le condensateur, en mettant en relation avec la terre un de ces liquides, et l'autre avec l'un des plateaux, mais encore avec le multiplicateur, quand on ferme le circuit avec deux lames de platine plongeant dans ces liquides.

En n'ayant égard seulement qu'à l'origine chimique des courants produits dans l'intérieur des corps organisés, il faut se rappeler, pour les interpréter, que, lorsque deux liquides différents, séparés par une membrane perméable, sont mis en communication au moyen de deux lames de platine en relation avec un multiplicateur, l'aiguille aimantée est déviée dans un sens qui indique que le liquide qui se comporte comme acide rend libre de l'électricité positive, et celui qui agit comme alcali, de l'électricité négative.

Nous allons commencer par exposer les effets électriques observés dans les végétaux dont la constitution est plus simple que celle des animaux.

Effets électriques produits dans la circulation de la séve. Il existe, dans les végétaux, une séve ascendante et une séve corticale qui n'a pas la même composition que la première et à laquelle quelques physiologistes accordent un mouvement descendant; l'une et l'autre sont séparées par des tissus, et produisent des effets électriques analogues à ceux dont il vient d'être question. Ces effets sont d'autant plus remarquables qu'ils ont une relation intime avec la constitution de l'écorce et celle du ligneux; pour les interpréter, il est

nécessaire de rappeler en peu de mots ce que nous savons sur la nature et la distribution de l'une et l'autre séve.

La tige d'une plante ligneuse dicotylédonée est formée de deux parties distinctes, séparées par une substance liquide que beaucoup de physiologistes considèrent comme un tissu demi-fluide, appelé cambium, qui serait le principal élément de l'organisation végétale. La partie extérieure est l'écorce; la partie intérieure, le bois proprement dit. L'écorce se compose, indépendamment du parenchyme, de l'épiderme, de l'enveloppe tubéreuse, de vaisseaux laticifères et de fibres corticales. Le bois est formé de rayons médullaires, de faisceaux ligneux et de moelle. L'écorce renferme donc, comme le système ligneux, une partie cellulaire et une partie fibreuse; seulement ces parties sont placées inversement : le parenchyme, qui est analogue à la moelle, occupe le pourtour de l'écorce, tandis que la moelle se trouve au centre du système ligneux. Cette inversion correspond, comme on le verra, à des effets électriques inverses.

Chaque tige ou branche étant composée d'une série non interrompue de couches concentriques hétérogènes, leurs contacts successifs doivent donner lieu à des effets électriques résultant de l'hétérogénéité des liquides humectant ces couches. Ces effets sont rendus sensibles, 1° à l'aide d'aiguilles de platine introduites dans deux couches contiguës ou plus ou moins éloignées, réagissant sur les couches voisines; 2° en recueillant avec un condensateur l'électricité enlevée au végétal par la vapeur d'eau exhalée par les feuilles et par l'oxygène provenant de la décomposition de l'acide carbonique sous l'influence solaire; 3° en faisant également usage d'aiguilles de platine pour constater les états électriques simultanés du végétal et de la terre.

Le liquide dont la terre est humectée pénètre dans les racines par leurs extrémités, en vertu d'effets d'endosmose et de capillarité, passe dans les cellules situées au-dessus, et arrive jusqu'à la tige, où le mouvement ascensionnel continue; il dissout une portion des substances qui se trouvent sur son passage, acquiert successivement plus de densité, et constitue alors ce qu'on appelle la séve, qui est définitivement élaborée dans les feuilles, qui sont les organes de la respiration.

Le gaz acide carbonique absorbé par les feuilles pendant la nuit est décomposé sous l'influence de la lumière solaire, le carbone assimilé et l'oxygène exhalé; la couleur des feuilles et celle de la jeune

écorce indique que des changements considérables se sont opérés dans la séve. Cette séve nouvellement élaborée redescend-elle à travers l'écorce, en déposant sur son passage les matières destinées à la formation des tissus ? Les expériences de M. Biot tendent à admettre le mouvement circulatoire de la séve.

Supposons maintenant qu'on ait mis à découvert, avec un instrument tranchant, une coupe transversale d'une tige de jeune peuplier, lorsqu'il est en feuilles, de manière à montrer visiblement toutes les parties concentriques dont elle se compose. Si l'on introduit simultanément les extrémités de deux aiguilles en platine, non polarisées, recouvertes ou non d'une couche d'eau distillée et en communication avec un multiplicateur très-long fil, l'une dans la moelle et l'autre dans l'une des enveloppes du ligneux ou du système cortical, l'aiguille aimantée est déviée de 5°, 10°, 15°, et même au delà, suivant la sensibilité de l'appareil, l'état séveux du végétal, et la nature de l'enveloppe où la seconde aiguille a été placée. Le sens de la déviation, qui est invariable, indique que la moelle fournit l'électricité positive à l'aiguille en contact avec elle, et l'enveloppe extérieure l'électricité négative à l'autre aiguille ; il y a donc courant de l'extérieur à l'intérieur (Becquerel).

L'aiguille aimantée, après avoir oscillé pendant quelques instants, prend une position d'équilibre qui n'est pas fixe ; la déviation diminue peu à peu, sans jamais atteindre zéro. Cette diminution est due à un effet de polarisation.

En retirant la première aiguille de la moelle et l'introduisant successivement dans la partie la plus rapprochée de l'écorce, on obtient des courants qui diminuent d'intensité, quoique toujours dirigés dans le même sens, et cela jusqu'à ce que cette même aiguille soit placée entre le ligneux et l'écorce, c'est-à-dire dans la partie en voie de formation, à laquelle on a donné le nom de cambium : le courant change alors de sens en même temps qu'il acquiert plus d'intensité.

Si l'on enlève un morceau d'écorce, dont l'épiderme se détache facilement, et qu'on applique une lame de platine sur l'épiderme et l'autre sur la partie intérieure, l'une et l'autre en rapport avec un multiplicateur, les effets acquièrent une grande intensité. Avec l'écorce d'une jeune branche d'aune en pleine séve, on obtient des déviations qui vont quelquefois jusqu'à 90°, et font même pirouetter l'aiguille. On reconnaît ainsi que l'écorce forme un couple voltaïque, dont la surface extérieure ou parenchymeuse est le côté positif, la

surface intérieure encore recouverte de cambium, le côté négatif. L'action de ce couple, lorsque l'écorce est enlevée de la branche, cesse peu de temps après.

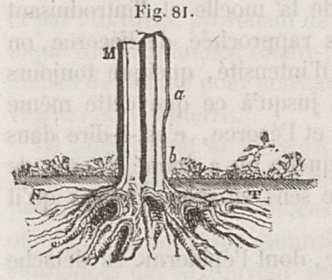
En résumé, on voit que depuis la moelle jusqu'au cambium les couches ligneuses sont de moins en moins positives relativement à la moelle; tandis que, depuis le cambium jusqu'à l'épiderme, les couches corticales et parenchymeuses sont de plus en plus positives, ou du moins se comportent comme telles dans la production des courants dérivés. Cette inversion dans les effets électriques s'accorde avec la position du tissu cellulaire dans l'écorce et dans le bois : dans l'écorce il est à l'extérieur, dans le bois à l'intérieur; dans l'un et l'autre cas, il est positif.

Toutes les couches parenchymeuses corticales jouissent toutes également de la propriété de produire des courants dérivés, à l'aide de deux aiguilles ou lames de platine servant à fermer le circuit.

Dans les plantes herbacées et les plantes grasses, telles que les cactus, les euphorbes, etc., etc., composées presque uniquement de parenchyme, il devient extrêmement difficile d'observer les effets électriques précédemment décrits, et qui sont si nets dans les tiges pourvues d'un système cortical (Becquerel).

Dans l'exposé des effets électriques produits pendant l'évolution de la séve, on s'est borné à rapporter ce qui avait lieu dans une section perpendiculaire à la tige; mais il importe aussi de connaître les effets électriques produits dans une section longitudinale.

Fig. 81.



Soient SS le sol, MT une coupe longitudinale dans la tige d'un végétal, *a* et *b* deux points pris dans la partie verte du parenchyme, à la distance de plusieurs décimètres l'un de l'autre.

On introduit transversalement dans le parenchyme, à chacun de ces points, une des aiguilles en platine; il se produit aussitôt un courant électrique, dont la direction annonce que l'aiguille placée en *b*, au-dessous de l'autre, prend l'électricité négative, et l'autre l'électricité positive. On voit par là que la séve parenchymeuse, en deux points quelconques *a* et *b*, situés à plusieurs décimètres, n'a pas la même composition, ce qui se conçoit : au point inférieur *b*, la séve étant moins oxygénée qu'en *a*, puisqu'elle perd de plus en plus de l'oxygène en parcou-

rant la partie verte du parenchyme, doit dégager de l'électricité négative.

On obtient également un courant en établissant une communication métallique entre le cambium et les feuilles, communication qui s'effectue en plaçant l'une des aiguilles entre l'écorce et le ligneux, l'autre dans une masse de feuilles superposées, faisant toujours partie du végétal, afin d'avoir un plus grand nombre de points de contact avec la seconde aiguille. Aussitôt que le circuit est fermé, il se produit un courant de l'intérieur à l'extérieur, comme dans le cas où l'aiguille qui est ici dans les feuilles se trouvait dans le parenchyme, et l'autre dans le cambium; résultat conforme à la nature de la séve qui circule dans les feuilles et le parenchyme.

La terre étant en communication directe et permanente avec les végétaux, par l'intermédiaire des racines, doit participer à leur état électrique, résultant des élaborations diverses qui ont lieu dans les tissus. L'expérience confirme cette déduction des faits observés. Cette question se rattache aux phénomènes électriques de l'atmosphère (Becquerel).

Opérons toujours avec des aiguilles, et mieux encore avec des lames de platine terminées en pointe, afin d'avoir un plus grand nombre de points de contact avec la terre et les tissus explorés. Si l'on introduit l'une des aiguilles dans le parenchyme d'une tige ou d'une branche de végétal quelconque, et l'autre dans le sol, à une distance plus ou moins considérable des racines, plusieurs mètres, par exemple, pourvu qu'il soit légèrement humide, il se manifeste un courant dont l'action sur l'aiguille aimantée indique toujours que la terre possède un excès d'électricité positive, le parenchyme un excès d'électricité contraire. Quant à l'intensité du courant produit, elle dépend de l'humidité du sol et de l'état séveux du végétal. La déviation de l'aiguille aimantée par première impulsion, avec un multiplicateur ordinaire, est de 15°, 20°, 30°, 40°, et même quelquefois au delà.

L'aiguille aimantée, quand elle est projetée à 15°, s'arrête à 8°, après avoir oscillé pendant quelques instants; peu à peu la déviation diminue, par l'effet de la polarisation acquise par les aiguilles ou lames de platine, et finit, au bout d'un certain temps, par ne plus être que de 2° à 3°. En dérangeant de place l'aiguille qui se trouve dans la terre, sans la retirer, afin de détruire la polarisation par le frottement, la déviation augmente de 2°; tandis qu'en agissant de

même à l'égard de l'autre aiguille, la déviation redevient ce qu'elle était primitivement. Cette différence dans l'intensité du courant, selon que l'on dérange l'une ou l'autre aiguille, tient à ce que, dans le second cas, la séve en contact avec l'aiguille s'altérant plus ou moins rapidement, le courant doit reprendre une nouvelle énergie quand la couche altérée est enlevée par le frottement.

On n'obtient peu ou point d'effet, comme on devait s'y attendre, lorsque l'une des aiguilles est dans le ligneux, près de la moelle, et l'autre dans la terre. Au lieu d'introduire l'une des aiguilles dans le parenchyme, on peut la placer dans un certain nombre de feuilles superposées tenant encore aux branches; dans ce cas, le même effet est produit. Cela tient à ce que la séve qui se trouve dans le parenchyme des feuilles a sensiblement la même composition que celle qui se trouve dans la partie parenchymeuse de l'écorce.

Les végétaux quels qu'ils soient, même ceux qui ont une tige purement herbacée, tels que la balsamine, le dalhia, etc., donnent les mêmes effets. On peut dès lors poser en principe que dans l'acte de la végétation, lorsque la germination est accomplie, la séve ascendante, qui communique avec le sol par l'intermédiaire des racines, lui transmet continuellement l'excès d'électricité positive dont elle s'empare dans sa réaction sur le liquide qui se trouve dans le parenchyme cortical, tandis que ce liquide prend l'électricité contraire qu'elle fournit à l'air, par l'évaporation aqueuse (Becquerel).

La végétation agit donc en sens inverse des causes qui rendent ordinairement l'air positif et la terre négative. Il est probable que les effets électriques qu'elle produit, en raison de leur continuité, particulièrement dans les parties de la surface terrestre où elle a le plus de puissance, telles que les régions tropicales et les contrées boisées, doivent exercer une influence quelconque sur l'état électrique de l'atmosphère, qui joue un si grand rôle dans la production des principaux phénomènes météorologiques.

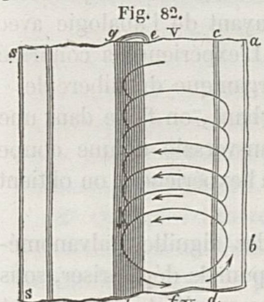
Peut-on conclure des faits exposés précédemment qu'il circule constamment des courants électriques, non-seulement dans les végétaux, mais encore entre ces derniers et la terre?

Pour répondre à cette question, il faut examiner si les deux conditions nécessaires pour la production de ces courants sont remplies.

La première est relative à la présence de deux liquides différents réagissant chimiquement l'un sur l'autre par l'intermédiaire des

tissus très-peu perméables. Cette condition est remplie dans le cas actuel. La seconde, qui concerne le contact des deux liquides par transition insensible, l'est également. En effet, dans une section horizontale d'une tige de végétal, la communication immédiate a bien lieu par l'intermédiaire des tissus entre la séve ascendante et la séve parenchymeuse; dans la section longitudinale, on sait que la séve ascendante, avant son entrée dans le végétal par les racines, se compose d'eau renfermant de l'air, du gaz acide carbonique et de très-petites quantités de matières salines et organiques enlevées au sol. En s'élevant, elle acquiert plus de densité, et constitue alors ce qu'on appelle la séve ascendante. Quant à la séve parenchymeuse, après avoir été élaborée dans les feuilles, elle perd insensiblement une portion de ses parties constituantes pour les besoins de la nutrition. L'une et l'autre séve se trouvent donc dans les conditions voulues pour former des contacts par transitions insensibles, et par conséquent pour produire des courants électriques sans l'intermédiaire de lames métalliques. Ces courants dont on suppose l'existence doivent circuler comme l'indique la figure ci-jointe.

Fig. 82.



ss section longitudinale faite dans un végétal: *ab* l'écorce; *cd* le cambium, ou composé qui le représente: *ef* le ligneux; *gh* la moelle. L'électricité positive, débouchant en *h* et *f* par les racines, et remontant suivant la direction *ba*, produit, suivant toutes les apparences, une foule de courants partiels allant de l'écorce à la moelle, et de là jusqu'aux dernières branches.

Il n'est pas possible de tirer d'autres inductions des faits observés jusqu'ici, ni d'indiquer les actions chimiques résultant de la circulation de tous ces courants dans les tissus; il faut en appeler à de nouvelles expériences pour savoir à quoi s'en tenir à cet égard.

On observe aussi des effets électriques dans les fruits, les tubercules; pour exemple nous prendrons les tubercules de pomme de terre.

Effets observés dans les tubercules de pomme de terre. Ce tubercule se compose d'un tissu cellulaire dans les interstices duquel se trouve de la fécule, le tout pénétré d'un liquide qui le rend plus ou moins aqueux. Ce liquide est-il de même nature depuis l'épiderme jusqu'au centre? C'est une question que l'on n'a pas encore cherché à résoudre, et que l'électricité va nous permettre d'aborder.

Quoique la pomme de terre paraisse avoir une organisation régulière, néanmoins on y distingue les parties suivantes, surtout lorsque l'œil est armé d'une loupe :

1° Un épiderme;

2° Une zone cellulaire analogue à l'écorce;

3° Quelques vaisseaux épars, rares, représentant le ligneux;

4° Enfin une masse cellulaire formant la plus grande partie du tubercule, et que l'on compare à la moelle des tiges.

En rapprochant cette organisation de la propriété que possède la pomme de terre de verdir quand elle reste exposée à la lumière, on est conduit à admettre qu'on doit la considérer comme provenant uniquement de l'extrémité renflée d'un bourgeon appartenant à une branche souterraine. Or, puisque ce tubercule présente dans son organisation plusieurs couches concentriques dont les rudiments sont visibles, on peut en conclure *à priori* que chacune d'elles ne doit pas avoir la même composition chimique, ou du moins ne doit pas être pénétrée d'un liquide identique dans sa composition. De là on devait en inférer que ces mêmes couches jouissent de propriétés électriques différentes, et ayant de l'analogie avec celles que présentent les tiges ligneuses. L'expérience a confirmé cette déduction, tirée de la constitution organique du tubercule.

Supposons qu'avec un instrument tranchant, on fasse dans une pomme de terre allongée une coupe transversale et une coupe longitudinale, pour les soumettre ensuite à l'expérience; on obtient les résultats suivants :

Coupe transversale. On introduit une des aiguilles galvanométriques, préalablement chauffée au rouge pour la dépolariser, sous l'épiderme, et l'autre dans l'intérieur : il se manifeste un courant électrique dont la direction indique que l'aiguille placée sous l'épiderme prend un excès d'électricité positive, et l'autre un excès d'électricité contraire. En retirant la première et la rapprochant de l'autre, elle reste toujours positive à l'égard de celle-ci. Il en est encore de même en opérant inversement, et rapprochant l'aiguille intérieure de celle qui se trouve sous l'épiderme.

Coupe longitudinale. On introduit d'abord l'une des aiguilles sous l'épiderme à l'un des bouts et l'autre au milieu du tubercule, puis successivement la seconde dans des parties de plus en plus rapprochées de la première : on trouve que l'aiguille extérieure est toujours positive à l'égard de l'autre, et d'autant moins que les deux aiguilles sont plus rapprochées du centre. Ces effets, qui

sont les mêmes que ceux accusés par la coupe transversale, prouvent de nouveau que la différence dans l'organisation des diverses parties d'une pomme de terre a pour conséquence immédiate une différence dans la nature des liquides qui se trouvent dans chacune d'elles, laquelle peut être rendue sensible par des réactions chimiques dont il va être question; mais, avant de les indiquer, nous ferons remarquer que, si l'on compare les effets électriques observés dans les tubercules avec ceux que présentent les tiges ligneuses, on voit qu'il n'y a plus inversion dans ces effets, comme dans ces dernières, et que la pomme de terre se comporte comme le système cortical d'une tige ligneuse.

D'autres tubercules donnent des résultats analogues.

Les faits observés conduisent aux conséquences suivantes :

1° Les effets électriques observés dans les tubercules et les racines, à l'aide d'aiguilles de platine, mettent en évidence l'hétérogénéité des sucs qui se trouvent dans les tissus depuis l'épiderme jusqu'au centre; hétérogénéité qui paraît être en rapport avec la constitution organique. Ces effets montrent encore que la pomme de terre, et la plupart des autres tubercules, dans le mode d'expérimentation adopté, se comporte comme le système cortical d'une tige ligneuse, c'est-à-dire que la partie sous l'épiderme est positive relativement à toutes les autres, et les parties contiguës par rapport aux parties centrales, et ainsi de suite jusqu'au centre, qui est éminemment négatif.

2° Quelques tubercules se comportent au contraire comme le système ligneux d'une tige dicotylédonée, c'est-à-dire que la partie centrale est positive par rapport aux parties environnantes jusqu'à l'épiderme.

3° Ces effets ont une durée assez courte, non pas peut-être à cause de la polarisation, mais en raison de réactions chimiques qui cessent peu de temps après l'introduction des aiguilles.

4° Les effets électriques contraires, obtenus en dérangeant légèrement de place les aiguilles, sans les retirer du tubercule ni produire de nouvelles perforations, ne peuvent s'expliquer qu'en admettant que le platine soit attaqué pendant son contact avec les sucs, ou bien que ceux-ci éprouvent des modifications de la part de l'air introduit par les aiguilles, ce qui est plus probable.

5° Les différents sucs, dans leur contact avec l'eau, rendant celle-ci positive, et le suc épidermique moins que les autres, il s'ensuit qu'en plongeant les deux bouts d'une pomme de terre, dont

l'un est privé de son épiderme et dont l'autre ne conserve plus que la partie centrale du tubercule, la partie périphérique ayant été enlevée, on constitue ainsi un véritable couple voltaïque, qui rend positive l'eau en contact avec le bout privé de son épiderme.

6° L'effet produit au contact de l'eau et des sucs explique pourquoi les végétaux de tous genres possèdent un excès d'électricité négative, la terre un excès d'électricité positive.

7° L'altération inégale des différents sucs est rendue sensible non-seulement au moyen des effets électriques, mais encore en exposant à l'air les pulpes remplies de ces sucs.

8° Enfin, les effets électriques observés sont tellement complexes, qu'il faut bien se garder d'en tirer des conséquences sur le rôle que peut jouer l'électricité dans les fonctions organiques, et par suite dans les phénomènes de la vie végétale.

Des effets électriques observés dans les animaux. L'existence de l'électricité dans les corps organisés ou non organisés est constatée par des effets d'électricité statique ou d'électricité dynamique, suivant qu'ils sont dus à des actions exercées dans des circuits non fermés ou fermés.

Les animaux étant composés de parties osseuses, de tissus et de liquides différents séparés les uns des autres par des tissus ou par des membranes, on conçoit parfaitement qu'en opérant, comme nous l'avons fait à l'égard des végétaux, avec des aiguilles ou des lames de platine, pour rechercher les effets électriques dus à la réaction de ces mêmes liquides les uns sur les autres, on arrive à des résultats semblables. C'est ainsi que M. Donné, en plaçant sur la peau une lame de platine en relation avec l'une des extrémités d'un multiplicateur, et dans la bouche une autre lame en relation avec l'autre extrémité, a obtenu un courant dirigé de la bouche à la peau; tandis qu'en introduisant l'une dans l'estomac d'un lapin ou d'un autre animal, et l'autre dans le foie, le courant allait du foie à l'estomac. Dans la première expérience, la bouche étant alcaline et la peau sécrétant un liquide acide, on avait évidemment un effet électro-chimique; il en était de même dans la seconde, puisque l'estomac sécrète un acide, et le foie un liquide alcalin. Ce ne sont là toutefois que des effets qui ne peuvent nous éclairer en rien sur l'intervention de l'électricité dans les phénomènes de la vie; mais, si l'on parvient un jour à découvrir cette intervention, ce sera en étudiant d'une part la singulière propriété que possède certains poissons de donner, quand on les touche avec la main, une commotion

semblable à celle de la bouteille de Leyde, de l'autre, en approfondissant tout ce qui concerne ce qu'on appelle le courant propre de la grenouille et en général des animaux. Nous commencerons par les poissons électriques.

Des poissons électriques. On connaît trois espèces de poissons, le gymnote (anguille de Surinam), la torpille (raie électrique) et le silure (de la famille des siluroïdes), qui donnent une commotion quand on les irrite en certaines parties du corps, pourvu toutefois qu'on ne les touche pas avec un corps non conducteur de l'électricité. Ces poissons jouissent donc de la faculté de produire de l'électricité, dont ils disposent à volonté pour s'en faire un moyen de défense, ou bien pour étourdir ou tuer leur proie.

M. de Humboldt a étudié les propriétés du gymnote dans le Caño de Bera, en Amérique, par une température de 26° à 27°. Suivant lui, elles sont moins développées dans les régions moins chaudes. Quand on touche cet animal avant qu'il soit blessé ou fatigué, la douleur et l'engourdissement sont si violents qu'il est difficile de se prononcer sur la nature de la sensation qu'on éprouve. M. de Humboldt dit n'avoir jamais reçu par la décharge d'une grande bouteille de Leyde une commotion plus énergique que celle qu'il ressentit en placant les deux pieds sur un gymnote nouvellement pêché; il éprouva longtemps une vive douleur dans les genoux et dans toutes les articulations. En général, on croit sentir à chaque coup une vibration interne pendant quelques secondes, à laquelle succède un engourdissement douloureux. Le phénomène est soumis à la volonté de l'animal, car il arrive souvent qu'on le touche dans les parties où réside l'organe principal sans éprouver d'effet.

Les propriétés électriques de la torpille sont connues depuis la plus haute antiquité; mais c'est à MM. Gay-Lussac et de Humboldt qu'on doit la détermination précise des circonstances principales du phénomène. Quand la torpille lance sa décharge, elle remue convulsivement les nageoires pectorales, mais on n'aperçoit que des mouvements à peine sensibles dans tout son corps. M. Matteucci s'est assuré que, dans cette circonstance, le corps n'éprouve aucun changement de volume. Le coup est plus ou moins douloureux, selon que le contact immédiat avec le corps se fait par l'intermédiaire d'une surface plus ou moins large; il faut irriter l'animal, le provoquer; il n'en résulte pas seulement une seule décharge, mais bien plusieurs qui sont lancées avec une célérité étonnante, selon

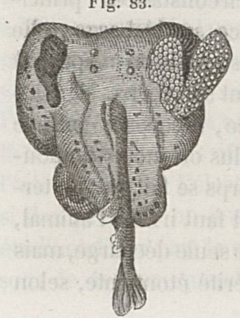
sa vitalité. La commotion se fait sentir dans les articulations des doigts, dans le poignet, dans le coude, et même dans l'épaule. L'effet étant sensible même lorsqu'on ne touche l'animal que d'un seul doigt, il faut en conclure que ce dernier donne passage à une portion de la décharge qui s'effectue par l'intermédiaire de l'organe. C'est donc le résultat d'un choc latéral.

En plaçant la torpille sur un plateau de métal, de manière à toucher la surface inférieure des organes qui lui sont propres, la main qui le soutient n'éprouve pas de commotion, bien qu'on provoque l'animal. Si le poisson est placé entre deux plateaux de métal dont les deux bords ne se touchent pas, et que l'on pose sur chaque plateau une main, on éprouve une commotion, tandis qu'on ne ressent rien quand les deux plateaux se touchent en un point. Quand l'animal est plein de vitalité et qu'il sort de la mer, les décharges se succèdent très-rapidement, et l'on ressent la commotion quelle que soit la partie du corps que l'on touche; mais, au fur et à mesure que l'animal s'affaiblit, il faut se rapprocher de plus en plus des parties correspondant aux organes électriques, pour éprouver des effets.

Pour connaître la distribution, sur le corps de la torpille, des points qu'il faut toucher pour recevoir la décharge, on couvre la surface de grenouilles préparées à la manière de Galvani et ainsi qu'on le dira plus loin, en ayant l'attention que chacune d'elles fasse arc pour qu'elle se contracte.

Des organes particuliers aux poissons électriques. Le gymnote, la torpille et la silure possèdent un organe particulier qui ne se trouve pas dans les autres poissons, et qui joue un des principaux rôles dans la décharge que lancent ces animaux. Nous nous attacherons particulièrement à l'organe de la torpille, qu'on a eu l'occasion d'étudier le plus fréquemment.

Fig. 83.



Ces poissons possèdent deux organes distincts situés de chaque côté de la tête.

Chacun de ces organes est composé d'un grand nombre de tubes aponévrotiques, d'une forme hexagonale, rangés parallèlement les uns à côté des autres, autour des branchies, et dont l'une des extrémités repose sur la peau de dessus, et l'autre sur celle de dessous. Hunter a compté onze cent quatre-vingt-deux de ces tubes dans un

seul organe d'une torpille longue de 1 mètre. Tous ces tubes sont exactement fermés à leurs deux extrémités par une membrane également aponévrotique qui s'étend sur toute la surface de l'animal. Si l'on examine l'organisation de ces tubes, on les trouve traversés horizontalement, d'après M. Geoffroy Saint-Hilaire, par de petites membranes placées l'une à côté de l'autre à de très-petites distances; l'espace compris entre eux est rempli d'une substance qui paraît composée d'albumine et de gélatine. Cet appareil est traversé par des filets nerveux très-nombreux, répartis dans chaque tube et correspondant à des nerfs remarquables par leur grosseur.

John Davy, qui a étudié l'organe de la torpille, en examinant une des alvéoles qui le composent avec une lentille d'un grossissement de cent diamètres, n'y a reconnu aucune structure régulière; le tout lui a paru formé d'une masse homogène traversée dans diverses directions par quelques fibres probablement nerveuses.

Enfin M. Breschet, qui a étudié aussi l'anatomie de la torpille, a fait les observations suivantes, après avoir reconnu l'existence des deux organes composés d'une multitude de prismes généralement à six pans, et disposés comme il a été dit plus haut. Ces prismes, qui sont plus larges vers la partie moyenne que vers les extrémités, donnent à cet organe une épaisseur plus considérable dans son milieu que vers les bords. En avant et au-devant de l'organe olfactif, les deux corps prismés sont en contact l'un avec l'autre, au moyen d'un disque intermédiaire composé de cellules de plus en plus petites, dans lesquelles se trouve un tissu entièrement semblable à celui qui constitue les prismes. L'organe entier est enveloppé d'une membrane de nature fibreuse, peu adhérente aux parties voisines, dont on l'isole avec la plus grande facilité. Elle s'insère en dehors sur plusieurs pièces cartilagineuses disposées en arc de cercle et articulées les unes avec les autres. Des muscles insérés sur cet arc cartilagineux peuvent, les uns comprimer l'organe, les autres produire un effet inverse; de la face interne de la tunique fibreuse qui enveloppe de toutes parts l'organe partent des cloisons également fibreuses, dans l'épaisseur desquelles se ramifient une foule prodigieuse de filets nerveux. Les cloisons fibreuses forment autant d'alvéoles semblables à celles d'un rayon de miel, avec cette différence cependant, que les alvéoles de l'organe électrique sont fermés de toutes parts; les cloisons sont tellement disposées qu'elles appartiennent à deux prismes à la fois. D'après cela, chaque prisme, quoique entièrement isolé des autres, n'a pas une tunique propre.

C'est aux points de réunion des cloisons, c'est-à-dire aux endroits où trois de ces cloisons se réunissent, que se trouvent placés les nerfs et les vaisseaux qui pénètrent dans l'intérieur de l'alvéole; c'est aussi à ces angles que le prisme est adhérent, tandis qu'il paraît entièrement isolé du reste des cloisons.

Quant à la structure des prismes, suivant M. Breschet, des filets nerveux traversent les cloisons au niveau des angles et se perdent dans les prismes, qui ne sont pas de nature nerveuse.

Si l'on fend la cloison d'un prisme longitudinalement, et qu'on la rejette sur les côtés de manière à mettre à nu une des faces du prisme, on voit sur cette face une foule de stries transversales liées entre elles par un tissu cellulaire extrêmement ténu et transparent. Ces stries n'indiquent pas des lamelles isolées et superposées les unes aux autres, comme les éléments d'une pile voltaïque, mais tout est lié ensemble et forme une masse homogène et amorphe, dans laquelle on ne distingue que des stries un peu plus opaques que le reste, que l'on suppose être nerveuses, attendu que leur point de départ correspond aux angles de réunion des cloisons, où l'on voit pénétrer les filets nerveux. La grande quantité de filets nerveux qui pénètrent dans l'intérieur de l'organe tend à confirmer cette manière de voir.

Des moyens employés pour reconnaître l'origine électrique de la commotion donnée par la torpille. On ne peut prouver l'origine électrique de la commotion donnée par la torpille qu'en montrant que, pendant qu'elle s'effectue, il se produit soit des étincelles, soit des courants électriques, soit des effets de décompositions électro-chimiques.

Pour observer l'étincelle, aussitôt que la torpille est tirée de l'eau et essuyée, on la place sur un plat métallique isolé; on applique sur son dos un autre plat que l'on manœuvre avec un manche de verre. De chacun de ces plats part une tige recourbée terminée par une petite boule. A ces deux boules, qui sont très-rapprochées l'une de l'autre, on applique avec de la gomme laque deux petites feuilles d'or. Si l'on irrite l'animal, en remuant les plats, on voit aussitôt les petites feuilles d'or s'approcher ou s'éloigner, et de petites étincelles brillantes aller de l'une à l'autre.

M. Matteucci et le père Linari sont parvenus à obtenir l'étincelle avec des hélices et des spirales électro-dynamiques.

La décharge ayant de l'analogie avec celle de la bouteille de Leyde, il faut donc employer pour observer les effets électro-ma-

gnétiques un multiplicateur servant à constater l'existence des courants instantanés.

L'un de nous a employé une méthode particulière pour observer le courant électrique à l'instant de la décharge (*). La direction du courant indique que la lame appliquée sur la partie supérieure de l'organe lui enlève l'électricité positive, et la lame en contact avec la partie inférieure, de l'électricité négative. Avec des hélices électro-dynamiques, on a pu aimanter des aiguilles d'acier placées dans leur intérieur. Le sens de l'aimantation était d'accord avec celui de la déviation de l'aiguille aimantée du multiplicateur.

M. Matteucci, tout en confirmant ces résultats, a reconnu en outre que les points de l'organe sur la face dorsale qui sont au-dessus des nerfs pénétrant dans cet organe, sont positifs relativement aux autres points de la même face dorsale; les points de l'organe sur la face abdominale qui correspondent à ceux qui sont positifs sur la face dorsale, sont négatifs relativement aux autres points de la même face abdominale. Au moyen de ces trois faits généraux on explique tous les effets du courant produit en touchant deux points quelconques de l'animal, et on conçoit pourquoi en touchant une seule face de l'organe dans deux points différents, ou bien deux organes à la fois sur la même face, on n'obtient aucun effet quand les points touchés sont symétriques.

Quant aux effets électro-chimiques, ils sont la conséquence de la nature électrique de la décharge; aussi les obtient-on en opérant avec des bandes de papier humectées d'une solution d'iodure de potassium, dont on entoure les lames de platine servant à transmettre le courant.

Des causes qui modifient la décharge de la torpille. Deux espèces de causes modifient les propriétés électriques de la torpille, lorsqu'on veut la conserver et la faire servir longtemps à des expériences : la masse d'eau et sa température, et le nombre de décharges qu'on lui a fait donner. Dans une masse d'eau de mer d'un mètre de hauteur et de $0^{m},30$ de largeur, ayant une température de $22^{o},7$, la torpille ne conserve sa faculté que pendant cinq ou six heures; la température vient-elle à baisser, la faculté disparaît presque aussitôt. On peut la ranimer pendant un certain temps en la replongeant dans de l'eau à une température plus élevée. Comment agit la chaleur dans cette circonstance? Est-ce en augmentant

(*) Becquerel, *Traité de physique appliquée*, t. II, p. 627.

l'activité de la respiration et l'activité de la circulation dans l'animal ? M. Matteucci, pour résoudre ces questions, a cherché à établir une relation entre les phénomènes de la respiration et l'intensité de la décharge; les résultats qu'il a obtenus à cet égard sembleraient montrer que la torpille qui a respiré plus qu'une autre est celle qui donne le plus de décharges. D'autres expériences lui ont montré aussi que la force de la décharge est proportionnelle, non-seulement à la respiration, mais encore à la force de la circulation de l'animal.

Du chlorure de strychnine ayant été introduit dans la bouche et l'estomac d'une torpille, la moelle épinière s'est contractée fortement quelques secondes après; des décharges se manifestèrent de temps à autre; dix minutes après, elles devinrent plus faibles et plus rapprochées, et l'animal mourut au milieu de vives contractions. Avec le chlorure de morphine, huit ou dix minutes après, elle donna spontanément de très-fortes décharges qui n'étaient pas accompagnées de contractions. Un multiplicateur ayant été introduit dans le circuit, l'aiguille fut continuellement agitée; en dix minutes elle donna soixante décharges; il fallut ensuite irriter l'animal pour obtenir des décharges : il ne vécut que quarante minutes, en donnant des décharges plus ou moins fortes.

Passons aux causes intérieures qui modifient le phénomène de la torpille; l'examen en a été fait avec soin par M. Matteucci. La décharge ne souffre aucune modification quand on enlève toute la peau de l'organe, celle du dos ou du bas-ventre. En coupant l'organe à moitié horizontalement, et en plaçant une lame de verre entre les deux parties séparées, la décharge a toujours lieu; mais, pour bien voir ce qui se passe dans cette circonstance, il faut avoir l'attention de détruire préalablement un des organes, ou d'anéantir sa puissance électrique en agissant sur la substance même de l'organe, soit au moyen de l'acide concentré ou de l'eau bouillante. Après avoir enlevé la peau qui recouvre l'organe, si on le mouille avec de l'acide sulfurique, on obtient aussitôt de fortes décharges; mais, à l'instant que la substance est détruite, la propriété électrique ne se manifeste plus. On peut couper la partie cartilagineuse qui entoure l'organe, les tubes sécréteurs, les muscles et les tendons environnants, sans que l'animal paraisse perdre aucunement de sa faculté. Vient-on à couper les nerfs de l'un des organes, la décharge cesse seulement de ce côté. Quand on en

coupe plusieurs, la décharge ne se manifeste que dans les parties où se ramifie le nef resté intact. L'animal, cependant, vit encore longtemps après qu'on lui a incisé l'organe. On suspend également les fonctions des nerfs en établissant des ligatures. Les nerfs étant coupés, si l'on tiraille un des troncs nerveux, on obtient encore quelques décharges.

Des expériences importantes de M. Matteucci semblent indiquer quelles sont les parties du cerveau où s'élabore l'électricité : il faut commencer par découvrir l'organe avec un rasoir, sans produire de lésion; la décharge se manifeste quand on touche le cerveau avec un corps quelconque. En explorant successivement tous les points de cet organe, on trouve que les premiers lobes peuvent être détruits ou enlevés, sans que pour cela la décharge cesse d'avoir lieu. Les lobes suivants, quand ils sont touchés ou blessés, donnent de fortes contractions, ou même des décharges quand l'animal a beaucoup de vitalité. Le troisième lobe se comporte comme le premier; mais il n'en est pas de même du quatrième et dernier lobe : car, lorsqu'il est détruit, le pouvoir électrique de l'animal disparaît, lors même qu'on laisserait subsister le reste du cerveau. Il paraît donc que les organes électriques se réduisent au quatrième lobe du cerveau, à ses nerfs et à l'organe proprement dit. Les rapports sont tels entre ce lobe et l'organe, que si l'on touche la partie droite, c'est l'organe droit qui fonctionne. Le contraire a lieu en touchant la partie gauche dans une torpille affaiblie, dont le cerveau a été découvert : si l'on touche le lobe électrique, l'animal donne des décharges beaucoup plus fortes que lorsqu'il était plein de vie. Le courant va du dos au ventre comme à l'ordinaire. Vient-on à blesser le lobe, la décharge a lieu; mais, dans ce cas, le courant va indifféremment du dos au ventre ou du ventre au dos. On obtient ainsi quatre ou cinq décharges, après quoi la faculté électrique est anéantie.

Il reste à examiner les effets produits quand on applique l'action voltaïque au cerveau et aux nerfs qui se rendent aux organes électriques. Le cerveau ayant été mis à découvert, deux multiplicateurs furent mis en rapport avec les deux organes et l'animal couvert de grenouilles afin de distinguer les principaux points rendus capables de transmettre la décharge. On enfonça l'électrode négative dans l'organe sur la partie dorsale et près du bord extérieur; l'autre électrode fut placée sur la partie droite du lobe électrique : il y eut aussitôt une décharge. M. Matteucci pense, d'après plusieurs essais

qu'il a tentés, que la décharge et le courant ne proviennent pas d'un courant dérivé.

Comment agissent les ligatures des nerfs de l'organe sous l'influence voltaïque? Les quatre nerfs de l'organe droit d'une forte torpille très-vivace ayant été liés, on a opéré comme précédemment, en mettant à nu le cerveau. Quand le courant cheminait directement, il n'y avait pas de décharge; dirigé en sens inverse, il ne produisait que de faibles contractions. En opérant sur l'organe même, on a alors observé les faits suivants : un des organes fut séparé sans enlever la peau, en coupant les nerfs et les branchies, et tranchant circulairement toutes les parties environnant l'organe du côté de la tête. L'organe avec les quatre nerfs fut posé sur une lame de verre et mis en relation avec un multiplicateur. La surface fut recouverte de grenouilles préparées, l'électrode négative introduite dans l'organe même, et la positive appliquée sur les quatre nerfs; l'aiguille aimantée fut aussitôt déviée de 4°, et les grenouilles éprouvèrent de fortes contractions. Les quatre nerfs étant placés sur la lame de platine, le courant n'avait plus d'intensité sensible. En résumé; le courant électrique agissant sur les nerfs produit soit des contractions, soit des décharges; l'action voltaïque est le dernier stimulant agissant sur le quatrième lobe, capable de provoquer la décharge.

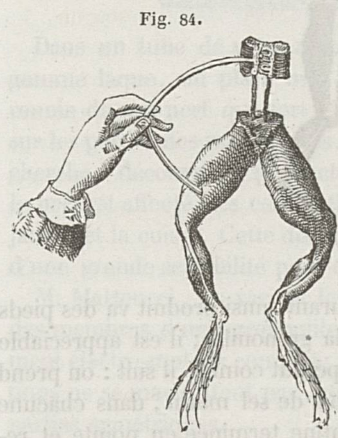
Le gymnote, sur lequel on a moins expérimenté que sur la torpille, a conduit aux mêmes conséquences; c'est ainsi que M. Faraday a obtenu successivement, dans l'acte de la décharge, l'étincelle, la décomposition électro-chimique, la déviation de l'aiguille aimantée dans le multiplicateur et une élévation de température dans des fils conjonctifs d'un petit diamètre.

Il paraît que, dans la torpille et le gymnote, la puissance électrique développée est en raison directe de la force nerveuse qu'ils possèdent; la décharge est ordinairement suivie d'un affaiblissement, de même que l'action musculaire. Ainsi, tout concourt à prouver que la force nerveuse peut être convertie en force électrique, de même que l'électricité peut produire de la chaleur; mais on ne peut dire que la réciproque soit vraie.

L'étude des phénomènes que présentent les poissons électriques démontre l'existence d'une classe à part d'animaux dans lesquels le cerveau élabore de l'électricité dont l'animal fait usage comme d'une arme offensive et défensive. Il pourrait se faire cependant qu'une semblable élaboration eût lieu dans les autres animaux,

non pas pour produire des décharges analogues à celles de la bouteille de Leyde, mais bien pour remplir d'autres fonctions essentielles à la vie, telles que la formation des sécrétions, la digestion, etc.; les faits manquent toutefois pour donner de la force à cette assertion. Nous allons montrer maintenant l'existence des courants électriques dans les autres animaux.

Fig. 84.



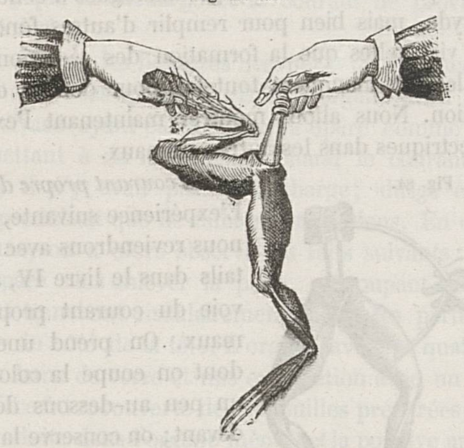
Du courant propre des animaux. L'expérience suivante, sur laquelle nous reviendrons avec plus de détails dans le livre IV, a mis sur la voie du courant propre des animaux. On prend une grenouille dont on coupe la colonne dorsale un peu au-dessous des pattes de devant; on conserve la partie antérieure dont on enlève la peau en la retournant, puis on détache les chairs qui entourent la colonne, afin que les cuisses, entièrement dénudées, ne tiennent à la colonne vertébrale que par les nerfs lombaires. Si l'on arme maintenant le muscle crural et le nerf lombaire d'une lame de métal différent, et que l'on établisse la communication entre les deux armatures, le muscle se contracte aussitôt violemment. On peut se borner, comme l'indique la figure, à toucher le muscle et le nerf avec un arc composé de deux métaux différents : zinc et cuivre.

Volta attribua l'effet à un dégagement d'électricité produit au contact des deux métaux. Galvani, pour combattre cette opinion, avança qu'on pourrait faire naître les contractions sans armatures en mettant seulement en contact les muscles et les nerfs.

On prend à cet effet une grenouille préparée comme à l'ordinaire (voir page suivante, fig. 84 bis); on soutient avec la main la colonne vertébrale; de l'autre, on saisit un des pieds, et l'on fait ployer la jambe jusqu'à ce que les muscles de celle-ci viennent toucher les nerfs cruraux : il en résulte aussitôt de vives contractions, qui ne se manifestent toutefois qu'autant que la grenouille est robuste, que les muscles ne sont pas surchargés de sang, et que la préparation est faite rapidement.

Nobili a prouvé que l'effet est dû à un courant électrique dirigé de telle manière que le nerf fournit l'électricité positive et le

Fig. 84 bis.



muscle l'électricité négative. Le courant ainsi produit va des pieds à la tête, et est appelé courant de la grenouille ; il est appréciable à un multiplicateur à fil long, en opérant comme il suit : on prend deux capsules remplies d'une solution de sel marin, dans chacune desquelles plonge une lame de platine terminée en pointe et recouverte de gomme laque presque jusqu'aux extrémités, afin d'éviter les courants secondaires. Une grenouille ayant été préparée à la manière de Galvani, on plonge un des morceaux de l'épine dans une des capsules, les jambes dans l'autre, les cuisses se trouvant entre les deux vases. Le courant produit une déviation qui va quelquefois jusqu'à 20°, quand l'animal a une grande vitalité et que l'appareil est sensible.

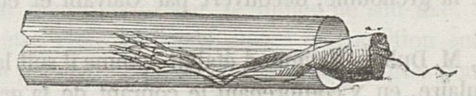
M. Matteucci a obtenu le courant avec l'animal vivant, en étendant la grenouille sur un taffetas vernissé ; après l'avoir préparée, on place alors un des conducteurs sur l'un des tendons des jambes, et l'autre sur les nerfs spinaux. On a un courant plus fort en formant une pile avec plusieurs grenouilles, mettant en contact le muscle crural de l'une avec le nerf lombaire d'une autre.

Pour comparer le courant propre de deux grenouilles, on les place sur un plan isolant, en les mettant en opposition, le nerf de l'une avec le nerf de l'autre ; on a alors la différence entre les deux courants. Le courant de la grenouille ne s'affaiblit pas en le laissant circuler ; ainsi les polarisations secondaires des extrémités de l'animal ne sont pas appréciables.

Dans ses différentes observations, M. Matteucci s'est servi d'une

cuisse de grenouille préparée ainsi que le représente la figure 84 ter, et qu'il a nommée grenouille galvanoscopique.

Fig. 84 ter.



Dans un tube de verre recouvert d'une couche de vernis à la gomme laque, on place une jambe et une cuisse de grenouille, munie de son nerf qui sort à l'extérieur du tube; on place le nerf sur les parties des muscles des autres grenouilles dans lesquelles on cherche à découvrir la production d'un courant électrique. Lorsque le nerf est affecté, les contractions ont lieu immédiatement dans la jambe et la cuisse. Cette disposition constitue donc un électroscope d'une grande sensibilité pour ce genre d'expériences.

M. Matteucci, en variant les expériences, a trouvé que chacun des membres d'une grenouille peut être considéré comme un élément électro-moteur complet; d'où il suit que, lorsque les contractions ne se manifestent pas, cela tient à ce que l'on a touché deux parties symétriques.

D'où peut donc provenir le courant propre de la grenouille? Pour remonter à la cause de sa production, il faut rechercher les parties de la grenouille qui sont indispensables à cette production, ainsi que les circonstances anatomiques et physiologiques capables de faire varier son intensité.

M. Dubois-Reymond a fait une série de recherches intéressantes sur ce sujet, dont nous allons essayer de donner une idée. Nobili avait trouvé, comme nous l'avons dit précédemment que la contraction produite au contact des muscles et des nerfs provenait d'un courant électrique dirigé dans un sens tel que le nerf fournissait l'électricité positive et le muscle l'électricité négative. Le courant était dirigé des pieds à la tête. M. Matteucci, en 1841, montra que l'on obtenait également la contraction en mettant en contact le nerf avec une section transversale, au lieu de l'aponévrose. Il démontra ensuite que, dans cette expérience, l'intérieur du muscle se comporte, à l'égard de la surface, comme le cuivre à l'égard du zinc dans un couple voltaïque. Ce physicien mit encore ce fait hors de doute en coupant à moitié un certain nombre de cuisses de grenouilles et les arrangeant en forme de pile, en faisant communiquer ensemble la partie interne de l'une des cuisses avec

la surface externe d'une autre, ainsi de suite. Le courant de la pile ainsi formée, allait de l'intérieur à l'extérieur des tronçons de cuisse; il a appelé ce courant *courant musculaire* pour le distinguer du courant de la grenouille, découvert par Galvani et étudié ensuite par Nobili.

En 1842, M. Dubois-Raymond établit comme il suit la loi du courant musculaire, en y comprenant le courant de la grenouille, lequel n'est que la généralisation du fait fondamental trouvé par M. Matteucci : *Toutes les fois qu'un arc conducteur est établi entre un point quelconque de la coupe longitudinale du muscle, soit naturelle, soit artificielle, et un point également arbitraire de la coupe transversale soit naturelle, soit artificielle du même muscle, il existe dans cet arc un courant dirigé de la coupe longitudinale à la coupe transversale.*

La coupe longitudinale du muscle n'est autre que la surface du muscle qui ne présente que les côtés du prisme que figurent les faisceaux primitifs: cette coupe est naturelle lorsque la surface charnue est intacte; elle est artificielle lorsqu'elle est mise à découvert avec le scalpel ou le déchirement du muscle. La coupe transversale est celle qui n'offre que les bases du prisme représentant les faisceaux primitifs, quelle que soit l'inclinaison de la coupe par rapport à la direction de ces faisceaux; elle est naturelle quand elle se compose des extrémités de tous les faisceaux primitifs qui aboutissent côte à côte au tendon du muscle, et artificielle quand elle est mise à nu à l'aide du scalpel. Les muscles des cuisses de la grenouille permettent de réaliser ces coupes et de mettre en évidence la loi citée, qui établit l'identité du courant musculaire et du courant de la grenouille. On peut considérer effectivement ce dernier courant comme la résultante du courant circulant incessamment entre la coupe longitudinale naturelle, et les coupes transversales naturelles de tous les muscles des extrémités inférieures de la grenouille. Le nerf, dans l'expérience de Nobili, ne remplirait donc que le rôle de conducteur.

Pour compléter la loi, il s'agissait de reconnaître, avec un galvanomètre extrêmement sensible (*), ce qui arrivait en établissant un arc conducteur entre deux points quelconques de la coupe longitudinale ou de la coupe transversale du muscle. Pour l'interprétation

(*) Le galvanomètre de 25,000 tours, dont on fait aujourd'hui un fréquent usage, a été construit à cette occasion.

des effets produits, M. Dubois-Raymond suppose au muscle la forme d'un cylindre droit à base circulaire, et il appelle équateur du cylindre le cercle d'intersection de la surface latérale du cylindre et d'un plan passant par le milieu de son axe. L'aiguille du galvanomètre reste en repos quand la condition suivante est remplie : 1° si les extrémités du fil se trouvent toutes deux dans la surface latérale du cylindre, il faut qu'elles se trouvent à égale distance des centres de ses bases. Dans tout autre cas, il y a déviation de l'aiguille aimantée, laquelle indique un courant dirigé dans l'arc dérivateur de l'extrémité la plus rapprochée de l'équateur, à l'extrémité plus rapprochée de l'une des bases du cylindre; cette déviation est d'autant plus forte, que le point du milieu entre les extrémités de l'arc dérivateur est plus près de la limite entre la surface latérale du cylindre et l'une de ses bases. Si la distance du point milieu à cette limite vient à être moindre que la demi-distance des deux extrémités de l'arc l'une de l'autre, c'est-à-dire si l'une de ces deux extrémités se trouve appliquée à la surface latérale et l'autre à la base du cylindre, le courant, tout en gardant la même direction, augmente considérablement d'intensité.

On peut tracer alors comme il suit la courbe des intensités du courant musculaire. On prend pour abscisses les côtés du rectangle résultant de l'intersection de la surface latérale du cylindre et d'un plan qui passe par son axe, et en menant sur chaque moitié de chaque côté du rectangle les ordonnées parallèlement à la droite qui partage à moitié l'angle adjacent, on peut tracer la courbe des intensités du courant musculaire en faisant glisser le point milieu entre les extrémités de l'arc dérivateur tout autour du rectangle, la distance entre les extrémités étant constante.

L'ordonnée de la courbe est nulle toutes les fois que le point milieu coïncide avec le milieu d'un des côtés du rectangle. Si ce point s'éloigne de ce milieu pour se rapprocher de l'angle du rectangle, c'est-à-dire de la limite entre la surface latérale du cylindre et sa base, l'ordonnée acquiert des valeurs toujours plus considérables.

Nous ne suivrons pas M. Dubois-Raymond dans les expériences qu'il a faites pour tracer la courbe des intensités du courant musculaire; nous dirons seulement que la loi de ce courant est également celle du courant nerveux que M. Dubois-Raymond a étudié, en admettant des coupes longitudinales et transversales dans les

nerfs. Il a cherché aussi, en partant des mêmes principes, à montrer la modification qu'éprouve la loi pendant la contraction du muscle. Cette modification consiste en ce qu'au moment de la contraction, toutes les ordonnées de la courbe des intensités du courant musculaire subissent une réduction de leur grandeur proportionnelle à leur grandeur relative.

Je ne dois pas omettre une observation qui n'est pas sans importance : à raison de la durée extrêmement courte de la contraction et du moment d'inertie de l'aiguille du galvanomètre, il ne suffit pas de faire faire au muscle une contraction unique pour avoir une déviation, il faut encore produire le tétanos, afin de prolonger l'action du courant sur l'aiguille.

« Qu'on s'imagine maintenant, » dit M. Dubois-Raymond, « les « deux extrémités du galvanomètre appliquées à deux points quel« conques du muscle, l'aiguille sera maintenue dans une déviation « constante, dont le sens et la grandeur, dans chaque cas donné, « pourront être aisément prévus, d'après la loi que je viens de faire « connaître. A l'instant où, à l'aide de certains artifices dont il va « être plus amplement question tout à l'heure, le muscle entre « en tétanos, on voit l'aiguille reculer, dépasser le zéro du ca« dran, et aller osciller de l'autre côté pendant la durée du téta« nos. Or, quels que soient les points du muscle auxquels on ait « appliqué les extrémités du galvanomètre, dans chaque cas donné, « la grandeur de l'action négative qui accompagne le tétanos est « proportionnelle à l'intensité primitive du courant musculaire. « Ainsi, par exemple, lorsque les extrémités du galvanomètre sont « toutes appliquées à la coupe longitudinale du muscle et à égale « distance de l'équateur du cylindre que le muscle figure, la dé« viation primitive est nulle ; et conformément à ce que je viens de « dire, l'aiguille reste à zéro, même dans le tétanos le plus actif.

« La modification qu'éprouve la loi du courant musculaire par « l'effet de la contraction consiste donc simplement en ce qu'au « moment de cet acte, toutes les ordonnées de la courbe des in« tensités du courant musculaire subissent une réduction de leur « grandeur proportionnelle à leur grandeur relative.

« A cause de cette proportionnalité, il va sans dire que l'action « électro-motrice négative de la contraction s'observe d'autant plus « facilement que l'intensité primitive du courant musculaire est « plus considérable. C'est donc le courant qu'on obtient en plaçant « l'une des deux extrémités de l'arc dérivateur sur la coupe longi-

« tudinale, l'autre sur la coupe transversale du muscle qui se prête « le mieux à l'étude du phénomène en question. Aussi est-ce sur « ce courant que j'ai, pour la première fois, signalé ce phénomène « dans mon mémoire de 1847. J'avais alors tétanisé le muscle en « soumettant son nerf moteur à la série continue des courants ins- « tantanés d'un appareil conducteur volta-électrique. »

Mais, ce mode d'expérimentation pouvant donner lieu à une objection, on produisit le même phénomène en tétanisant le muscle au moyen de l'irritation mécanique, chimique et thermique du nerf moteur, et enfin avec l'intoxication du nitrate de strychnine.

« Dans ce dernier cas, je procédai de différentes manières : tan- « tôt je mettais à nu le muscle gastro-cnémien, et je dérivais le « courant de la surface charnue du muscle et de l'aponévrose du « tendon d'Achille; tantôt je laissais la grenouille complétement « intacte, et je dérivais le courant en appliquant les deux extré- « mités du galvanomètre, l'une aux pieds de la grenouille, l'autre « à son bassin. Dans ce dernier cas, j'observais, au moment de « l'explosion du tétanos, une action électro-motrice en sens con- « traire du courant de la grenouille, c'est-à-dire dirigée du bassin « aux pieds. Je pouvais aussi mettre la grenouille à califourchon « sur les vases rhéophores du galvanomètre, et ne tétaniser que « l'une de ses jambes, après avoir coupé le nerf sciatique de « l'autre. J'observais alors au moment du tétanos un courant di- « rect, d'après la notion de Nobili, dans la jambe dont le nerf « était intact. »

Il s'est occupé également de la loi qui préside à l'irritation électrique des nerfs et de la modification du courant musculaire par l'effet de la contraction : l'irritation nerveuse est l'état du nerf qui détermine la contraction du muscle dans lequel il se ramifie, et l'on prend la force de la contraction pour mesurer l'irritation nerveuse qui l'a produite. On distingue dans le courant l'intensité et la densité. L'intensité se mesure par les moyens connus; la densité dans une section transversale du circuit représente le quotient de son intensité divisée par l'étendue de la section donnée. La grandeur de l'irritation produite doit donc dépendre, non pas de l'intensité du courant, mais bien de sa densité dans le nerf à irriter. Voici l'énoncé de la loi (*) :

« Prenant pour abscisse le temps et pour ordonnées les densités

(*) *Annales de chimie et de physique*, t. XXX, p. 180.

« du courant dans le nerf à irriter, et ayant égard à ce qu'il y a « pour la contraction un maximum qu'elle ne saurait dépasser, il « en résulte que la grandeur de l'irritation nerveuse est une fonc« tion de la dérivée de l'équation de la courbe des densités, fonc« tion qui croît d'une manière continue avec l'accroissement à la « variable, de zéro, jusqu'à une certaine valeur positive ou néga« tive de celle-ci. On voit donc que l'irritation électrique des nerfs « est soumise à une loi semblable à celle qui préside à l'induction « d'un circuit parcouru par l'électricité sur un circuit avoisinant, « puisque la force électro-motrice induite est, elle aussi, propor« tionnelle à la dérivée de l'équation de la courbe des intensités « du courant inducteur. »

M. Dubois-Raymond assure que cette loi permet d'expliquer une foule de phénomènes épars dans les recueils scientifiques. Ainsi elle rend compte, suivant lui, pourquoi ce n'est qu'au début et à la fin du courant que le muscle entre en contraction, pourquoi les plus légères traces d'électricité ordinaire produisent de violentes contractions, etc., etc. Nous ferons remarquer que ces effets sont rapportés ordinairement aux courants par induction qui ne se manifestent que lors de la fermeture ou de la rupture du circuit, ainsi qu'on le verra plus loin.

Le galvanomètre est un instrument qui convient parfaitement quand il s'agit d'observer des courants électriques continus, mais il n'en est plus de même lorsque ces courants sont instantanés : dans ce cas il faut employer la grenouille comme moyen rhéoscopique d'une très-grande sensibilité. On ne doit donc pas employer le même appareil quand il s'agit de rechercher des courants continus ou des courants instantanés. Ces principes ont été appliqués à l'étude des effets électriques produits dans l'acte de la contraction, effets entrevus par M. Matteucci, dont l'un de nous avait signalé l'existence, et qui ont été démontrés par M. Dubois-Raymond.

Si l'on place dans le circuit du galvanomètre un muscle pouvant être contracté en irritant son nerf moteur, et qu'en l'ouvrant on y introduise le nerf d'une grenouille rhéoscopique, celle-ci se contracte également, quand on fait contracter le muscle : cet effet n'a lieu qu'autant que le muscle est placé dans ce circuit de manière à ce que l'une des extrémités du galvanomètre soit appliquée à la coupe longitudinale, l'autre à la coupe transversale du muscle. On en tire la conséquence que les contractions de la grenouille rhéoscopique sont dues aux variations d'intensité du courant mus-

culaire dans le muscle stimulé directement Cette expérience met en évidence la production d'un courant instantané à l'instant où l'on fait contracter un muscle.

Lorsqu'on fait naître le tétanos dans un muscle, la grenouille rhéoscopique est aussitôt prise de tétanos, qui persiste tant que dure le tétanos dans le muscle excité. Pendant que ces effets se produisent, l'aiguille aimantée se met à osciller du côté opposé où la déviation avait eu lieu d'abord.

Enfin M. Dubois-Raymond, guidé par les considérations théoriques que nous venons d'exposer, a cherché à prouver que la contraction volontaire de l'un des bras de l'homme suffit pour produire un courant électrique appréciable à un galvanomètre d'une très-grande sensibilité, faisant partie d'un circuit fermé dans lequel se trouvent compris les deux bras et le corps. Voici le dispositif de l'expérience : on place sur une table deux bocaux à large ouverture contenant de l'eau salée, et communiquant ensemble au moyen d'une mèche de coton ou d'une bande épaisse de carton préalablement imbibée. Dans chacun de ces bocaux plonge une lame de platine en communication avec l'une des extrémités du fil d'un multiplicateur, formant vingt à trente mille tours ; il se produit dans les premiers instants un courant dû à la présence de corps étrangers adhérant sur la surface des lames de platine. On maintient le circuit fermé tant que ce courant de polarisation n'a pas disparu. Aussitôt qu'il est devenu insensible à l'aiguille aimantée, on enlève la mèche de coton ou la bande de carton, et on plonge dans l'eau salée un doigt de chaque main, après avoir pris la précaution de laver préalablement les mains dans de l'eau de savon, puis dans de l'eau pure. Les mains et le corps complètent le circuit; les mains sont appuyées sur une barre de bois qui fait partie de l'appareil. On observe quelquefois un courant qui a ordinairement peu de durée ; aussitôt qu'il a disparu, on contracte à plusieurs reprises un des bras, et on voit l'aiguille se dévier peu à peu dans un sens qui indique que pendant la contraction il s'est produit un courant électrique tel que le doigt du bras contracté a pris l'électricité positive, le liquide adjacent l'électricité négative.

M. Dubois-Raymond a attribué une origine physiologique à ce courant ; nous ne partageons pas son opinion à cet égard. Voici le fait sur lequel nous appuyons la nôtre : les deux doigts ayant été plongés dans de l'eau salée, et l'aiguille aimantée étant au zéro, si l'on retire l'un des doigts de l'eau et qu'on le contracte avec le bras

correspondant, puis qu'on le replonge de nouveau une minute après, il se produit un courant dans le même sens et à peu près d'égale intensité que la première fois. Que se passe-t-il en dehors de l'eau salée dans le doigt, pendant la contraction? La peau du doigt se recouvre d'une sécrétion acide dont le contact avec l'eau salée dégage de l'électricité qui produit les effets observés. Le courant a donc une origine électro-chimique, et ne prouve nullement qu'il y ait dégagement d'électricité pendant l'acte de la contraction musculaire (Becquerel).

LIVRE IV.

EFFETS DUS A L'ÉLECTRICITÉ.

CHAPITRE PREMIER.

Effets mécaniques.

Les actions dues à l'électricité sont nombreuses, et, pour les étudier en détail, nous distinguerons les effets qu'elles produisent en effets mécaniques, physiques, chimiques et physiologiques. Ces effets, qui diffèrent entre eux, sont plus ou moins marqués suivant la tension de l'électricité, et suivant qu'on l'emploie sous forme de décharge ou de courant; aussi, dans chaque circonstance, nous indiquerons les actions dues à l'électricité de tension et celles qui résultent de l'emploi des courants électriques.

Il ne sera pas question dans ce livre des actions magnétiques de l'électricité, qui seront traitées dans le troisième volume, en même temps que l'électro-magnétisme; nous réserverons également tout ce qui concerne les actions chimiques produites par l'électricité, pour n'en parler que dans le second volume, en traitant de l'électro-chimie.

Effets mécaniques produits par des décharges électriques. Quand une étincelle ou une décharge électrique éclate dans l'air, indépendamment de l'élévation de température qui l'accompagne, il se produit un refoulement de l'air. L'appareil nommé improprement thermomètre de Kinnerstley met le fait en évidence.

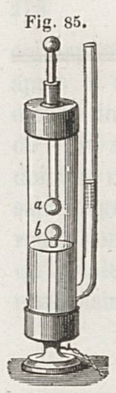
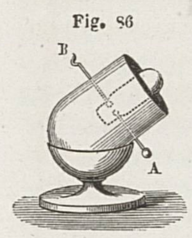


Fig. 85.

Deux boules en cuivre *a* et *b* sont placées au milieu d'un fort tube fermé par les deux bouts et en relation avec un petit tube manométrique. De l'eau colorée placée au fond du tube et dans le tube manométrique indique, par l'ascension de la colonne dans ce dernier, quand la pression de l'air extérieur augmente. Si l'on fait éclater une étincelle entre les boules, le liquide monte dans les tubes, puis redescend aussitôt, mais non pas tout à fait, au niveau primitif; ainsi, indépendamment de l'élévation de température qui se manifeste de cette manière, il y a refoulement de l'air intérieur dû au passage de la décharge.

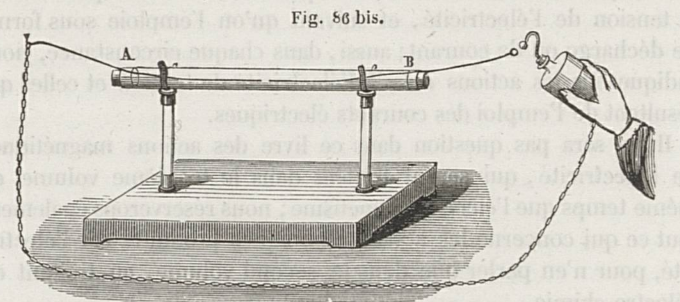
Le mortier électrique conduit à la même conclusion : deux conducteurs en cuivre B et A viennent aboutir au fond de l'intérieur d'un petit mortier en ivoire, formé par conséquent de substance isolante; l'orifice est fermé par une boule en liége. Quand une décharge éclate entre les petites boules intérieures, le refoulement de l'air et la détente qui le suit projettent la petite balle de liége hors du mortier. Pour augmenter l'effet, on met un peu d'éther ou d'alcool au fond du mortier légèrement incliné.

Fig. 86



On peut également, en faisant éclater une étincelle provenant d'une bouteille de Leyde entre les deux extrémités de fils de cuivre

Fig. 86 bis.

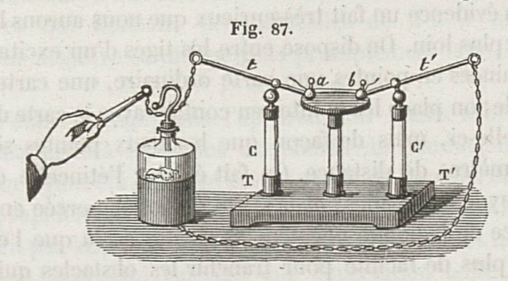


placés au milieu d'un petit tube en verre AB (fig. 86 bis) exactement rempli d'eau et bouché aux deux extrémités, déterminer la rupture de ce tube.

Pour faire ces expériences et quelques-unes de celles qui seront rapportées dans ce livre, on fait usage d'un instrument appelé

excitateur universel, lequel est composé simplement de deux tiges en cuivre *t*, *t'*, mobiles à l'aide d'un mouvement de genoux autour

Fig. 87.

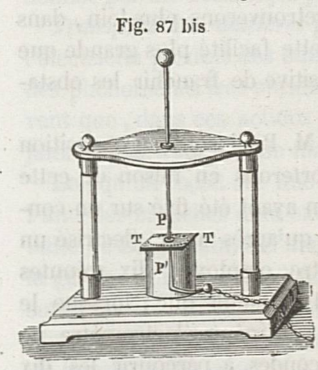


des extrémités de deux tiges isolantes *c*, *c'*, qui sont fixées à un support T T'. Si l'on veut faire passer une décharge électrique entre les boules *a*, *b*, qui terminent les tiges *t*, *t'*, on peut les rapprocher plus ou moins l'une de l'autre. Dans la figure, on a représenté un fil métallique tendu entre les boules *a* et *b* et disposé pour le faire traverser par la décharge électrique. En outre, une petite tablette variable de hauteur permet de placer des objets sur lesquels ou à côté desquels on veut faire passer les décharges. Des chaînes et des conducteurs sont nécessaires pour obtenir des décharges plus ou moins fortes entre les boules *a* et *b*.

Quand on place sur la tablette une feuille de papier bien sèche, si l'on amène les deux boules de cuivre en contact avec elle, et que leur éloignement ne soit que de 2 ou 3 centimètres, en faisant éclater la décharge d'une batterie de plusieurs bocaux, le papier est déchiré. Cet effet est encore dû à l'action mécanique de l'électricité.

Lorsque la décharge électrique traverse un corps, s'il est résistant, il peut être brisé. On peut mettre ce fait en évidence en perçant une lame de verre à l'aide d'une étincelle électrique. On dispose alors deux pointes P, P' en face l'une de l'autre, de chaque côté d'une lame de verre TT; on met un peu d'huile là où les pointes touchent le verre, afin de s'opposer à la diffusion de l'électricité : si la charge d'une bouteille de Leyde est suffisante, le verre se trouve percé souvent d'un trou rond.

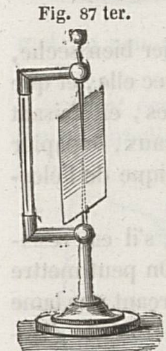
Fig. 87 bis



Le bois peut être également brisé par les décharges électriques.

L'expérience du perce-carte mérite encore d'être citée; elle met en outre en évidence un fait très-curieux que nous aurons l'occasion d'invoquer plus loin. On dispose entre les tiges d'un excitateur universel terminées en pointes une carte ordinaire, une carte à jouer, par exemple; on place les pointes en contact avec la carte de chaque côté de celle-ci, mais de façon que les deux pointes soient à 2 ou 3 centimètres de distance. On fait éclater l'étincelle d'un bouteille de Leyde entre elles, et la carte se trouve percée en un point situé en face de la pointe négative. Il résulte de là que l'électricité positive a plus de facilité pour franchir les obstacles qui se trouvent sur son passage que l'électricité négative, comme du reste on le démontrera plus loin; elle traverse effectivement l'air pour venir rejoindre la négative en face de la pointe par où débouche celle-ci. Mais l'action n'a pas lieu seulement comme si le flux électrique se transmettait de la pointe + à la pointe —, car l'ouverture de la carte a des bavures de chaque côté, ce qui montre qu'au milieu du papier constituant la carte, il y a eu décomposition des électricités par influence et ensuite déchirure dans tous les sens.

Fig. 87 ter.



Si, à l'aide d'un excitateur disposé plus simplement et qui porte le nom de *perce-carte*, on place l'appareil sous la cloche d'une machine pneumatique, on trouve que dans l'air raréfié l'ouverture n'est plus placée en face de la pointe négative, qu'elle se déplace et tend à se mettre au milieu de la distance qui sépare les deux pointes à raison d'une moindre résistance (Tremery).

C'est donc sous l'action d'une pression extérieure que l'ouverture tend à se produire en face de la pointe négative. Nous retrouverons plus loin, dans d'autres expériences, cette facilité plus grande que possède l'électricité positive de franchir les obstacles.

Cependant quelques expériences de M. Belli sont en opposition avec cette conclusion; nous les rapporterons en raison de cette contradiction. Un électromètre à cadran ayant été fixé sur un conducteur horizontal, M. Belli a trouvé qu'après avoir électrisé un conducteur positivement, l'électromètre employait dix minutes deux secondes à descendre de 20° à 10°, tandis que, lorsque le conducteur était chargé négativement, le même électromètre ne mettait que quatre minutes trente secondes à parcourir les dix

mêmes degrés, toutes choses égales d'ailleurs. De là M. Belli a conclu que dans l'air et aux tensions mesurées avec l'électromètre à cadran, et qui donnent des étincelles de 2 à 4 millimètres, l'électricité négative se dissipe plus promptement que l'électricité positive.

Rien n'étant changé dans l'appareil, on ajusta seulement une pointe métallique à l'une des extrémités du conducteur isolé. Le conducteur ayant été électrisé positivement, la tige de l'électromètre descendit rapidement à 6°. A la déperdition qui avait eu lieu jusqu'à ce moment par la pointe, avec un bruit perceptible et une lumière visible dans l'obscurité, succéda une déperdition lente, semblable à celle qui avait lieu sans la pointe. Avec de l'électricité négative, la tige de l'électromètre descendit rapidement à 6°,5 et ce n'est que parvenue à ce point que la déperdition commença à s'opérer lentement.

Au lieu d'adapter la pointe métallique au conducteur lui-même, on la plaça vis-à-vis de son extrémité sur un pied non isolé. Ce résultat prouva encore la différence existant entre le pouvoir absorbant et émissif des pointes pour chacune des deux électricités. Si ces faits étaient constatés, ils indiqueraient que la force ordinairement moindre que possède l'électricité négative, comparée à celle de l'électricité positive fournie par la même machine, ne dépend pas seulement de la disposition moins avantageuse des conducteurs destinés à recueillir la première électricité, mais aussi de la déperdition plus facile qu'elle éprouve.

Cependant ces expériences sont à étudier de nouveau, car les faits que nous allons citer viennent à l'appui de l'explication donnée par M. Tremery à propos de l'expérience du perce-carte.

Transport des matières par les décharges électriques. Lorsque l'électricité produit des étincelles, des décharges, elle donne lieu à des phénomènes très-curieux que nous allons décrire et qui prouvent que, dans ces actions, le transport de l'électricité ne se fait jamais sans transport de matière pondérable.

Lorsqu'on reçoit sur une plaque d'argent polie, en contact avec l'une des branches d'un excitateur, la décharge positive d'une bouteille de Leyde munie d'une boule de laiton en communication avec la garniture intérieure et dont l'autre branche communique avec la surface extérieure, on observe à l'endroit où la décharge a eu lieu une tache circulaire jaunâtre couleur de laiton, et qui disparaît peu de temps après, comme si la matière déposée se volatilisait. Ces

taches observées dans quelques circonstances par Priestley, ont servi de point de départ aux expériences pleines d'intérêt de Fusinieri et que nous allons rapporter.

Au milieu des taches jaunes obtenues de cette manière, on aperçoit souvent à l'aide du microscope des petits points blancs, ayant l'aspect de l'oxyde de zinc. De là Fusinieri en a tiré la conséquence que l'étincelle électrique contenait du métal en partie oxydé et en partie fondu, enlevé de la surface d'où elle est partie. En opérant avec une forte bouteille, on observe sur la surface opposée de la lame d'argent, à son point de contact avec la boule de laiton de l'excitateur, une petite excavation dans laquelle l'argent a été fondu. Les effet produits dénotent donc une action contraire sur les deux surfaces. Avec deux grandes jarres formant batterie, il a obtenu les effets suivants : on a commencé par mettre en contact avec le bouton de l'une de ces jarres un gros fil métallique terminé par une boule d'argent; un disque de cuivre bien décapé fut fixé à un manche de verre. On pouvait ainsi faire passer la décharge de la boule d'argent à l'excitateur par l'intermédiaire du disque en cuivre. La batterie ayant été chargée, le disque de cuivre fut mis en contact avec la boule supérieure de l'excitateur, et l'on recevait sur l'autre surface la décharge de la boule d'argent.

Il se produisait toujours sur la surface de cuivre, en regard de la boule d'argent, une tache pourprée due à une oxydation superficielle, au centre de laquelle se trouvait une légère cavité avec une petite tache brun-verdâtre, parsemée de points infiniment petits d'argent.

De l'autre côté du disque de cuivre, à son point de contact avec la boule de l'excitateur, il existait une petite cavité circulaire renfermant de l'argent fondu, ayant une couleur verdâtre. Sur la boule de laiton de l'excitateur, à son point de contact avec le cuivre, se trouvait également une cavité circulaire renfermant aussi de l'argent fondu. Dans cette expérience le point de contact de la surface antérieure du disque de cuivre avec la boule d'argent n'était pas immédiatement opposé au point de contact de la surface postérieure avec la boule de l'excitateur, la distance entre ces deux points étant de cinq à huit lignes, et néanmoins l'argent parcourait cet espace dans le cuivre sans s'allier avec lui.

Sur la boule d'argent se trouvaient de petits points noirs probablement d'oxyde de cuivre. Le double transport en sens contraire paraît avoir eu lieu ici. Il semblerait résulter de là que l'étincelle

partie de l'argent a emporté avec elle des molécules de ce métal, qu'elle a transporté sur la surface et dans l'intérieur sans s'allier avec lui ; après cela, une partie de l'argent transporté aurait été déposée sur les parois de sortie et un autre sur la boule de l'excitateur en contact avec le cuivre. Pendant que ce phénomène de transport s'effectuait, de l'oxyde de cuivre était transporté en sens contraire à travers l'air, et se disséminait sur la boule d'argent.

L'expérience a été faite en mettant en contact le disque de cuivre, vers son centre, avec la boule d'argent, et l'on recevait l'étincelle sur l'autre surface de cuivre, afin qu'elle passât du cuivre à l'excitateur par l'air ; les mêmes phénomènes de transport se sont reproduits.

En substituant à la boule d'argent une boule d'or de 1 centimètre et demi de diamètre, et au disque de cuivre un disque d'argent bien décapé et d'environ 9 centimètres de diamètre, on obtenait des effets semblables ; car, en mettant en contact le centre du disque d'argent avec la boule d'or, et recevant l'étincelle de l'autre surface du disque sur la boule de l'excitateur, il existait sur la surface d'argent d'où partait l'étincelle une belle tache d'or d'environ 1 centimètre de largeur, mais variant de grandeur suivant l'intensité de la décharge. La distance transversale entre le centre de ces taches et le point de contact de l'autre surface avec la boule d'or était de 2, 3 et même 4 centimètres. L'or avait donc parcouru cette distance dans l'argent, sans se combiner avec lui. Au centre de la tache d'or sur l'argent se trouvait une légère cavité autour de laquelle on voyait à la loupe de petites taches disséminées de couleur brun-rougeâtre, ayant l'aspect d'un oxyde métallique. Les taches d'or s'affaiblissaient peu à peu, comme si ce métal se volatilisait. On en voyait encore des traces pendant quelques jours. Sur la surface opposée au contact de l'or avec l'argent se trouvait une petite cavité circulaire entourée d'une zone brune et renfermant de l'argent fondu. Au point de contact correspondant à la boule, il existait un petit cercle d'argent déprimé, dans lequel on reconnaissait des traces de fusion. Sur la boule d'argent de l'excitateur, il y avait des traces d'un très-mince dépôt d'or. On voit encore ici, comme dans les expériences précédentes, qu'en même temps que l'or était transporté au travers de l'argent à une distance de plusieurs centimètres, il y avait également transport en sens contraire de l'argent sur l'or au point de contact, plus une couche métallique oxydée sur la surface de l'argent d'où l'étincelle était sortie. Toutes

ces expériences semblent montrer que le transport des métaux a lieu au travers des métaux, et prouver en même temps que l'étincelle électrique est toujours accompagnée de matière à l'état de fusion ou d'incandescence; c'est même là une des conditions de son existence.

Il suit de là que, lorsque l'on fait passer des décharges électriques dans l'air entre les deux lames de métal, on doit les polariser, c'est-à-dire déposer sur leurs surfaces des corps étrangers qui produisent des courants électriques quand on les plonge dans l'eau. Nous verrons bientôt des effets de ce genre.

Les effets lumineux produits entre les pôles de la pile avec des métaux ou du charbon, et qui seront étudiés plus loin, sont aussi la conséquence de la présence de matières pondérables très-divisées en incandescence ou en combustion lors du passage de l'électricité. Nous verrons également que l'aspect des étincelles suffit souvent pour indiquer la présence de molécules incandescentes, puisqu'elles affectent les couleurs des métaux en combustion. Fusinieri a même émis l'opinion que les effets mécaniques de perforation, de rupture et de déchirements pourraient être dus à la matière elle-même, animée de la même vitesse que celle de l'électricité qui est excessive.

Figures dues à l'action de l'électricité. Quand on place une plaque de verre entre deux pointes dans l'arc de clôture d'une batterie, et que par la décharge une étincelle se meut sur chaque surface jusqu'au bord, on y reconnaît de faibles traces de désagrégation. Ces traces étudiées à l'électromètre sont conductrices; et ce qu'il y a de particulier, c'est qu'on y trouve d'autres parties de la surface qui sont devenues conductrices, sans avoir subi de modifications apparentes. On les rend sensibles en projetant de la vapeur avec la bouche; ce sont ces figures qu'on a appelées figures roriques. Elles sont plus belles sur le mica; au lieu d'une décharge complète de la batterie, il suffit d'employer les aigrettes bleuâtres qui jaillissent des pointes. Après l'action électrique, la surface du mica isole dans toutes les directions (Riess).

Ce qui s'oppose à admettre que ces figures soient produites par des particules métalliques transportées par l'étincelle, c'est que l'aspect des surfaces du verre et du mica n'est pas changé, et que ce dernier jouit de la propriété isolante.

En recevant l'étincelle sur des lames de plaqué d'or ou d'argent, elle y laisse une faible tache qui, après l'exposition à la vapeur humide, se présente sous l'aspect d'un cercle large de plusieurs

lignes parfaitement net, et entouré d'autres cercles plus ou moins chargés de vapeur.

Lorsqu'une décharge électrique parcourt une surface isolante de verre, elle pénètre à une certaine profondeur, et produit des altérations plus ou moins profondes qui ont de la ressemblance avec celles que l'on obtient en frottant le verre avec du sable (Simon). Ces traces sont plus visibles au bout de quelque temps qu'immédiatement après.

Avec le mica on obtient des changements encore plus réguliers. Si entre les deux pointes de l'arc de clôture de la batterie on place une feuille de mica, l'étincelle, sous des charges modérées, va depuis le point le plus rapproché jusqu'à un autre où l'épaisseur est moindre, ou même jusqu'au bord de la feuille, et laisse des traces d'une apparence très-régulière (Wartmann).

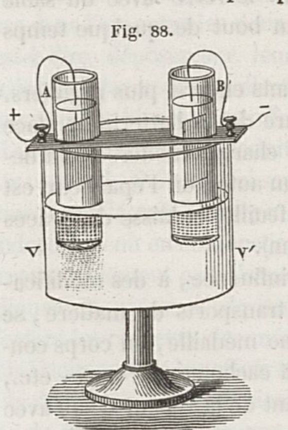
Tous ces effets, dus à des actions par influence, à des modifications de la surface des corps et à des transports de matière, se produisent également lorsqu'on place une médaille, un corps conducteur, sur une surface plane en cire à cacheter, en verre, etc., et qu'on électrise la première. En insufflant de la vapeur d'eau avec l'haleine, ou bien en exposant la surface aux émanations d'autres vapeurs, on a des empreintes de la médaille (Karsten, Riess, Masson, etc.). On s'est beaucoup occupé de ces empreintes qui sont rarement parfaites, et qui mettent seulement en évidence la faculté que possède l'électricité, dans les décharges, de transporter les particules de matière qui se trouvent sur son passage.

Transport des liquides dans le circuit voltaïque. Lorsqu'un courant électrique traverse des circuits dans lesquels se trouvent des liquides, il se produit, comme dans les décharges électriques, des transports de matières. Les premières expériences de ce genre furent faites par Porrett : il prit un vase en verre qu'il partagea en deux compartiments au moyen d'un diaphragme de vessie ; puis chaque cellule fut remplie d'eau ordinaire, sans addition d'aucun sel ; il plaça ensuite dans chacun d'eux une lame de platine en communication avec l'un des pôles d'une pile de 80 éléments. L'eau fut décomposée comme à l'ordinaire, mais le dégagement du gaz ne fut pas aussi rapide que si l'eau eût tenu en dissolution un sel ou un acide ; une grande partie de l'eau contenue dans le compartiment où se trouvait une lame positive fut chassée par une force d'impulsion dans le compartiment négatif, où le niveau de l'eau s'éleva. On voit donc que le courant électrique, quand il traverse un liquide

mauvais conducteur, tend à lui imprimer une impulsion dans le sens de la direction que suit l'électricité pour se rendre du pôle positif au pôle négatif. Cette expérience, nous le répétons, ne réussit bien qu'autant que l'eau est presque entièrement pure, ou du moins offre une certaine résistance au passage de l'électricité.

Les effets de transport peuvent être rendus manifestes par l'expérience suivante : on ferme la partie inférieure de deux tubes de verre de quelques millimètres de diamètre à l'aide d'un peu de kaolin délayé, et soutenu par une gaze de façon à ne pas tomber. Le kaolin doit être assez délayé pour que, les deux tubes étant plongés dans un vase plein d'eau contenant un peu de sel, le moindre choc fasse tomber quelques parcelles de l'argile au travers de l'eau. Si alors on met également de l'eau légèrement salée dans les deux tubes, et qu'on y plonge deux lames de platine, l'une en relation avec le pôle +, l'autre avec le pôle — d'une pile à auges de 60 éléments, on voit le kaolin tomber au-dessous du tube par où débouche l'électricité positive. En changeant le sens du courant, l'effet se produit de l'autre côté. Il faut quelques tâtonnements pour bien préparer cette expérience (Becquerel).

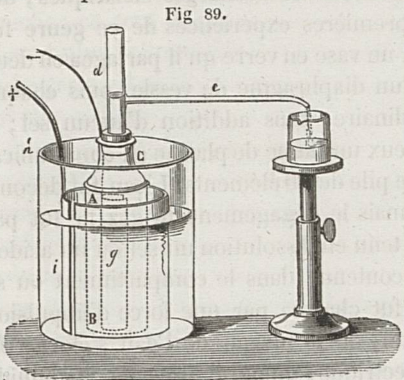
Fig. 88.



M. Wiedemann a employé la disposition suivante pour mettre le même phénomène en évidence.

Une petite cloche tubulée C est mastiquée à l'extrémité supérieure d'un cylindre d'argile poreuse AB fermé par le bas; à la tubulure on adapte un tube vertical *d*, auquel est soudé latéralement un tube *e*. Dans le cylindre d'argile se trouvait un cylindre *g* de cuivre ou de platine, mis en communication par un fil métallique avec le pôle négatif d'une pile (par exemple, une pile de Bunsen de 10 ou 20

Fig 89.



éléments). Un second cylindre de métal *i*, mis en communication avec le pôle positif de la pile, entoure le diaphragme. Tout l'appareil est renfermé dans un cylindre de verre *h*, rempli, ainsi que le cylindre d'argile, d'eau ou de tout autre liquide. L'intensité du courant est mesurée par un galvanomètre.

Aussitôt que le circuit est fermé, le liquide monte dans le cylindre poreux, et coule par le tube latéral dans un vase placé au-dessous.

On obtient de bons effets avec une dissolution légère de sulfate de cuivre et deux électrodes de cuivre ; il n'y a pas alors de gaz dégagé sur les lames. En changeant le sens du courant et rendant la lame intérieure *g* positive, le liquide s'abaisse dans le tube *d* au lieu de s'élever. Cette expérience montre que l'élévation de température due au passage du courant n'est pas la cause du phénomène, car, sans cela, il aurait lieu quel que fût le sens du courant. L'effet est donc dû à une action de transport qui se manifeste lors du passage de l'électricité.

En mesurant le liquide écoulé sous l'action de courants d'intensités diverses, on arrive d'abord à ce résultat, que les quantités de liquide écoulées dans des temps égaux sont directement proportionnelles à l'intensité du courant. Mais, lorsque la surface perméable du cylindre d'argile est peu à peu diminuée par une couche de gomme laque, tous choses égales d'ailleurs, les quantités de liquide écoulées sont indépendantes de la grandeur de la surface.

Dans des expériences faites à l'aide de ce procédé, un courant d'une intensité quelconque mettait le même temps à transporter 3 centimètres cubes d'eau à travers le diaphragme qu'à produire 1 centimètre cube de mélange détonant dans un voltamètre qui faisait partie du circuit.

Afin d'avoir des déterminations qui fussent indépendantes de la capillarité, de l'endosmose, etc., on a équilibré l'action mécanique du courant par une simple réaction hydrostatique. A cet effet, on a bouché à sa partie supérieure le tube du cylindre poreux, et on a mis en communication l'orifice d'écoulement avec un manomètre à mercure. Dans l'appareil se trouvait une dissolution de sulfate de cuivre. En faisant passer des courants de diverses intensités et en faisant varier la grandeur de la surface du diaphragme, le mercure restait stationnaire dans le manomètre à différentes hauteurs. Il résulte de la mesure des différentes pressions ainsi obtenues, que les hauteurs auxquelles les liquides s'élèvent sous l'action

d'un courant voltaïque sont directement proportionnelles à l'intensité du courant et en raison inverse de la surface libre du cylindre.

Phénomènes unipolaires. Nous venons de voir que les courants agissaient différemment suivant leur sens; nous avons dit également (page 95), en parlant des flammes et de la conductibilité des gaz, que l'électricité passait plus facilement dans un sens que dans l'autre, suivant la manière dont elle se présentait aux conducteurs. Erman, qui a étudié cette dernière question, a cherché à prouver que certains corps ne possèdent pas le même pouvoir conducteur pour chacune des deux électricités. Mais les effets qu'il a observés sont probablement dus à d'autres causes que celles qu'il a admises. Il a donné le nom d'*unipolaires* aux corps qui jouissent de cette propriété, et a nommé *phénomènes unipolaires* les effets qu'ils présentent.

Soit un appareil voltaïque isolé, dont chaque pôle communique avec un électroscope à feuilles d'or, très-sensible. On prend un prisme de savon bleu, et l'on insère dans un de ses bouts un fil métallique communiquant au sol. Si l'on touche par l'autre bout l'un des pôles de la pile, ce pôle est aussitôt déchargé, tandis que l'autre acquiert un excès de tension. Fait-on communiquer les deux pôles ensemble au moyen du savon et de deux fils métalliques, les deux électroscopes continuent à diverger; le savon se comporte comme un corps non conducteur. Si l'on touche maintenant le savon avec un fil de métal communiquant au sol, le pôle négatif est neutralisé et le pôle positif atteint son maximum de tension. Ces effets sont dus probablement à la présence d'un acide gras sur le pôle positif, provenant de la décomposition du savon par l'action du courant, lequel acide, en raison de son pouvoir non conducteur, s'oppose au passage du courant.

On doit ajouter que ces phénomènes n'ont lieu qu'après un certain temps nécessaire pour que le dépôt de l'acide gras puisse s'effectuer. Ainsi les propriétés unipolaires annoncées par Erman tiennent vraisemblablement à des produits secondaires déposés sur les lames décomposantes et non conducteurs de l'électricité. On a rapporté ici ces expériences pour prémunir les personnes qui cherchent à employer les forces électriques comme force chimique, contre une cause qui peut arrêter le passage du courant dans les circuits. Bien que ces expériences tendent à prouver que les phénomènes unipolaires peuvent, dans les décompositions électro-

chimiques, dépendre de la présence de corps isolants sur l'une des lames décomposantes, cependant il existe des faits qui paraissent montrer, de même que le fait observé par Porett et ceux qui sont indiqués plus haut, que l'une et l'autre électricité peuvent avoir un pouvoir d'action inégal.

Il ne resterait plus, pour terminer les effets mécaniques dus à l'action des courants, qu'à parler des actions mutuelles de deux fils parcourus par des courants électriques ; mais nous consacrerons un chapitre du troisième volume pour traiter l'ensemble de ces phénomènes, connus sous la dénomination de *phénomènes électro-dynamiques*.

CHAPITRE II.

Effets physiques.

Changement d'élasticité des métaux. Lorsque l'électricité circule dans les métaux, l'arrangement moléculaire peut se trouver modifié. Nous citerons à cette occasion les observations faites par Peltier, et qu'il serait intéressant de reprendre de nouveau pour bien connaître toutes les particularités du phénomène.

Voulant suivre l'arrangement des molécules du plomb dans la réduction de l'acétate, Peltier employa une lame de zinc placée au milieu d'une large spire d'un gros fil de cuivre rosette; les deux extrémités supérieures émergées étaient soudées pour former un couple voltaïque. Au bout de plusieurs mois, la portion émergée du fil de cuivre, très-ductile dans son origine, devint tellement aigre, qu'elle se rompait sous un faible effort; la portion émergée gardait à peu près sa ductibilité, du moins elle la conservait plus longtemps. La cassure du fil aigri offrait un grenu terne, qui indiquait non-seulement un nouvel arrangement moléculaire, mais encore une cémentation avec l'un des éléments de la dissolution.

Ce même fait de la fragilité des fils se représenta plus tard, lors de

l'établissement de longs fils de cuivre rosette tendus horizontalement et destinés à soutirer l'électricité de l'atmosphère pour la conduire dans le sol. Ces fils, ainsi exposés aux alternatives des saisons, des agents atmosphériques et aux courants électriques, devinrent aigres, cassants, et on fut obligé de les renouveler au bout de deux ans. Des fils argentés n'eurent pas plus de durée; des fils de laiton cassèrent au bout de six mois. Les conducteurs abrités gardèrent bien plus longtemps leur ductilité, mais finirent cependant par éprouver un changement moléculaire sous l'influence d'un courant permanent.

Lorsque les courants sont faibles et les conducteurs d'un grand diamètre, les effets doivent être beaucoup plus faibles, s'ils sont encore toutefois appréciables.

Dans les expériences précédentes, on n'a pas comparé d'une manière certaine les changements dans la cohésion et dans l'élasticité des fils métalliques. M. Wertheim, qui s'est occupé de ce sujet, en déterminant les variations du coefficient d'élasticité des corps soit par l'allongement des fils, soit par les vibrations, a été conduit aux conclusions suivantes :

1° Le courant électrique produit une diminution momentanée du coefficient d'élasticité dans les fils métalliques qu'il parcourt, et cela a lieu par son action propre et indépendamment de la diminution qui provient de l'élévation de température. Cette diminution disparaît entièrement avec le courant lui-même, quelque longue qu'ait été la durée de son action.

2° La grandeur de cette diminution dépend de la force du courant et probablement aussi de la résistance que le métal oppose à son passage.

3° La cohésion des fils est diminuée par le courant; toutefois la variabilité de cette propriété ne permet pas de distinguer si cette diminution est due à une action propre du courant, ou bien si elle est seulement une conséquence de l'élévation de température.

Ainsi, à moins d'une action très-prolongée, une action rapide ne produirait que de faibles changements dans les propriétés des corps.

Oxygène électrisé, ou *ozone*. On sait que la chaleur a la propriété de modifier certains corps simples tels que le soufre, le phosphore, le carbone, et que plusieurs oxydes métalliques, sans perdre de leur poids, éprouvent sous son influence de véritables transformations isomériques. L'électricité peut-elle donner lieu à des effets analogues?

Les différents résultats que présente l'oxygène soumis à l'action de décharges électriques, ou bien produit sous l'influence des courants électriques, semblent devoir être expliqués, du moins jusqu'ici, par une action analogue. Nous devons dire que c'est le seul corps qui ait présenté jusqu'à présent des résultats de ce genre.

Van Marum, ayant à sa disposition la grande machine électrique du musée de Teyler, voulut examiner quels seraient les effets résultant de l'action de très-fortes étincelles sur différentes substances, et principalement sur les gaz. Il reprit à cette occasion les expériences faites par divers physiciens, qui avaient reconnu, même avant Priestley, que les gaz éprouvaient des changements considérables par suite du passage des étincelles électriques. Les résultats de ses recherches sur l'électrisation de l'oxygène démontrèrent que, dans ce gaz, une succession d'étincelles électriques développe une odeur caractéristique, et qu'une fois ce gaz soumis à cette électrisation préalable, il acquiert la faculté de se combiner rapidement au mercure, effet qui n'a lieu que très-lentement à la température ordinaire.

Ces résultats importants furent en quelque sorte oubliés pendant longtemps. Vers l'année 1840, M. Schœnbein eut l'occasion de remarquer l'odeur qui accompagne la production du gaz oxygène lors de la décomposition de l'eau par la pile, odeur qui rappellait celle du phosphore et du soufre en combustion, et la compara à celle qui se manifeste dans les décharges électriques ou lorsque la foudre éclate.

M. Schœnbein étudia alors avec soin les propriétés du gaz oxygène émanant du pôle positif dans un appareil à décomposer l'eau, lorsque le gaz conserve son odeur.

Il démontra que ce principe odorant peut se conserver indéfiniment dans des flacons bien fermés; que le développement de ce principe au pôle positif dépend de la nature du métal jouant le rôle d'électrode positive, et de la nature du liquide décomposé; que le platine et l'or, seuls, dégagent l'odeur en question, les autres substances oxydables ne donnant pas lieu à ces effets; qu'enfin l'eau acidulée par l'acide sulfurique, l'acide azotique, ou l'eau contenant des sels très-oxygénés, produisent l'oxygène odorant à un haut degré, mais que certains sels, tels que les chlorures, bromures, iodures, le protosulfate de fer, etc., dissous dans l'eau, ne donnent lieu à aucun effet de ce genre. Il montra éga-

lement que le gaz odorant perd son odeur quand on l'agite avec du charbon, du mercure, du fer, etc.

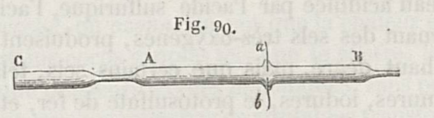
M. Schœnbein examina, en outre, les effets curieux de polarisation électrique, produits en plongeant des lames de platine ou d'or dans le gaz odorant émanant du pôle positif d'une pile, puis en faisant usage de ces lames comme d'électrodes pour manifester le courant électrique qui prend naissance lorsque les lames attachées aux deux extrémités du fil d'un multiplicateur sont plongées dans un liquide conducteur. Il reconnut que des lames ainsi préparées se polarisaient très-fortement, de façon à être négatives par rapport à d'autres lames plongées préalablement dans l'oxygène pur mais non odorant; cette polarisation est toujours de peu de durée, et les effets étaient promptement détruits. Les métaux oxydables, à l'exception du cuivre, ne présentèrent pas ces effets. Des lames de platine ou d'or mises à quelque distance d'une pointe émoussée d'une bonne machine électrique manifestèrent également des phénomènes de polarisation. D'après ces premières recherches, M. Schœnbein ne pensa pas devoir se prononcer sur la nature du composé odorant; il lui donna cependant le nom d'*ozone*.

Le même physicien a fait connaître une méthode chimique permettant d'obtenir une quantité plus considérable d'ozone que par tout autre procédé : elle consiste à faire agir de l'oxygène humide, ou de l'air humide, sur du phosphore à la température de 20 ou 25°; le gaz devient alors odorant, et acquiert toutes les propriétés du gaz émanant du pôle positif dans un appareil à décomposer l'eau, et celle de l'air dans lequel on fait éclater une série d'étincelles électriques. Mais nous ne parlerons pas ici des procédés chimiques de préparation de cette substance; il ne sera question que de l'influence de l'électricité pour donner lieu aux effets que l'on étudie.

Plusieurs physiciens et chimistes se sont occupés depuis de cette question; nous allons faire connaître les différentes propriétés de l'oxygène électrisé, telles qu'elles résultent de leurs recherches, après avoir donné les modes de préparation les plus simples.

Quand on veut examiner l'action des étincelles électriques de l'oxygène sec et isolé, on soude au milieu d'un tube de verre

Fig. 90.

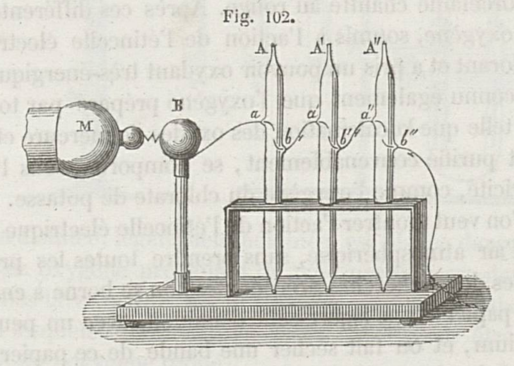


CB deux fils de platine *a* et *b*; ce tube est effilé à son extrémité

B et étranglé seulement en A. On fait alors arriver l'oxygène sec et pur par la partie du tube C, puis on ferme à la lampe l'extrémité B, lorsque le tube est rempli depuis longtemps d'oxygène pur ; au moment de la fermeture du verre, et pour éviter l'excès de pression dans l'intérieur de l'appareil, on ouvre un orifice qui a été ménagé sur la partie du tube qui amène l'oxygène en C, afin de laisser échapper l'excès d'oxygène, lorsque la pointe B du tube se trouve fermée ; on fond ensuite à la lampe la partie A du tube : on a donc enfermé ainsi de l'oxygène pur et sec dans le tube AB.

Il est facile de faire passer simultanément des étincelles électriques dans une série de tubes préparés comme nous venons de l'in-

Fig. 102.



diquer ; dans ce but, on les juxtapose de façon que le fil *a'* d'un second tube communique avec le fil *b* du premier tube, et ainsi de suite ; on attache le fil *a* du premier tube à un conducteur placé près d'une machine électrique, et le second fil *b''* du dernier tube à un fil communiquant au sol. Pour que les étincelles éclatent vivement dans l'intérieur des tubes, on doit faire communiquer le fil de platine *a*, qui est en présence de la machine électrique, avec une sphère conductrice en cuivre B, et exciter les étincelles entre le conducteur M de la machine et la sphère. La distance qui doit exister entre la sphère conductrice et le conducteur M dépend de la distance des fils *a, b*, dans l'intérieur des tubes, du nombre de ces tubes et de la force de la machine. On a souvent mis en expérience cinq ou six tubes pleins d'oxygène ; le gaz contenu dans ces tubes présente alors les propriétés suivantes, après l'action de l'étincelle (E. Fremy et E. Becquerel) :

1° Il est fortement odorant ;

2° Il bleuit immédiatement le papier ioduré et amidonné ;

3° Il détermine à froid l'oxydation de l'argent;

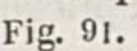
4° Une dissolution d'iodure de potassium lui enlève immédiatement son pouvoir oxydant.

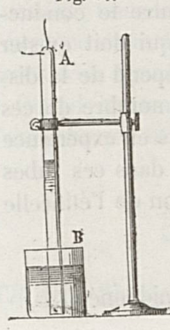
En un mot, on a constaté sur ce gaz électrisé toutes les propriétés qui caractérisent l'ozone et qui ont été étudiées par MM. Schœnbein, Marignac, Delarive, etc...

Dans la crainte que l'oxygène dégagé du chlorate de potasse ne contînt des traces d'un corps étranger donnant lieu aux effets que nous avons signalés, ce gaz a été soumis aux agents de purification les plus énergiques : on l'a mis en contact, à plusieurs reprises, avec de la potasse et de l'acide sulfurique, et on l'a fait passer dans un tube de porcelaine chauffé au rouge. Après ces différentes purifications, l'oxygène, soumis à l'action de l'étincelle électrique, est devenu odorant et a pris un pouvoir oxydant très-énergique.

On a reconnu également que l'oxygène préparé par toute autre méthode, telle que la calcination des oxydes de mercure et de manganèse, et purifié convenablement, se comporte, sous l'influence de l'électricité, comme l'oxygène du chlorate de potasse.

Lorsqu'on veut montrer l'action de l'étincelle électrique sur l'oxygène de l'air atmosphérique, sans prendre toutes les précautions minutieuses des recherches précédentes, on se borne à enduire une feuille de papier d'une légère colle d'amidon, avec un peu d'iodure de potassium, et on fait sécher une bande de ce papier humecté au moment de s'en servir; elle bleuit immédiatement par l'action de l'ozone, l'iode de l'iodure de potassium étant mis en liberté. Si alors on prend une large bande de ce papier humide, qu'on l'applique sur un conducteur positif d'une machine électrique, et qu'on promène au-dessus du papier à 1 ou 2 centimètres de distance une pointe métallique tenue à la main, le papier bleuit en face de la pointe (Becquerel).


Fig. 91.

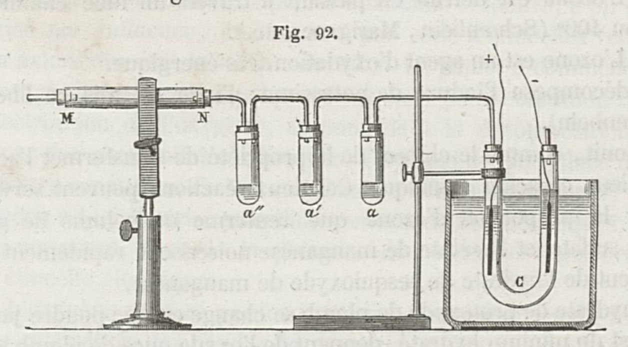


Si l'on veut démontrer l'action de l'oxygène électrisé sur une dissolution d'iodure de potassium, on introduit de l'oxygène très-pur dans un petit tube eudiométrique AB, placé sur une dissolution d'iodure de potassium recouverte d'huile. Alors, en faisant passer des étincelles électriques entre les deux extrémités des fils de platine soudés au haut du tube, et en prenant les précautions indiquées plus haut pour faire éclater les étincelles entre les pointes, on voit que l'oxygène est absorbé d'une ma-

nière régulière et que la dissolution prend une teinte jaune très-marquée. Il faut plusieurs heures d'action avec un tube d'un très-petit diamètre, et une forte machine électrique, pour avoir une absorption complète (Fremy et E. Becquerel).

Si l'on veut démontrer les propriétés oxydantes de l'oxygène provenant de la décomposition électro-chimique de l'eau, l'appareil suivant est d'un usage facile.

Fig. 92.



De l'eau distillée, légèrement acidulée, est placée dans un tube en U, C; le gaz oxygène provenant du pôle positif passe dans une série de tubes laveurs *a*, *a'* *a''*, et traverse ensuite des tubes comme MN, dans lesquels se trouvent les corps qui doivent être soumis à l'influence de l'oxygène ozoné.

L'oxygène entraîne toujours de l'acide sulfurique, qui est arrêté par le premier tube laveur; on a reconnu que l'eau du troisième tube ne précipitait pas par le chlorure de barium : l'oxygène, en traversant les trois tubes laveurs, se trouve donc entièrement débarrassé de l'acide qu'il entraîne en sortant du tube en U.

Cet appareil permet en outre d'abaisser la température du tube dans lequel l'eau est décomposée.

On a pu, à l'aide des différents procédés d'expérimentation, arriver aux conclusions suivantes :

1° La production de l'ozone dans le passage des étincelles électriques s'arrête à un certain moment; en tout cas, la quantité d'oxygène modifié n'est qu'une faible fraction du volume de gaz employé.

Lors de la décomposition de l'eau acidulée par la pile, la production de l'ozone est indépendante de la présence de l'azote. Seulement il faut avoir soin de maintenir l'appareil à décomposition à basse température.

D'après les expériences de M. Soret, en refroidissant l'appareil à décomposer l'eau jusqu'à — 7° et au delà, la proportion d'ozone, par rapport à l'oxygène produit, ne dépasse pas 0,0048, soit les $\frac{5}{1000}$ du volume ; en ne refroidissant pas, la proportion diminue beaucoup et peut être insensible. L'eau acidulée par l'acide sulfurique donne plus d'ozone que l'eau acidulée par l'acide chromique.

2° L'ozone est détruit en passant à travers un tube chauffé à 300 ou 400° (Schœnbein, Marignac, etc.).

3° L'ozone est un agent d'oxydation très-énergique.

Il décompose l'iodure de potassium ; l'iode est mis en liberté (Schœnbein).

Il jouit, comme le chlore, de la propriété de transformer l'acide arsenieux en acide arsénique. Ces deux réactions peuvent servir à doser la proportion d'ozone que renferme un volume de gaz.

Le sulfate et l'acétate de manganèse noircissent rapidement, et donnent de l'hydrate de sesquioxyde de manganèse.

L'hydrate de protoxyde de plomb se change en une poudre jaune qui est du minium hydraté, donnant de l'oxyde puce de plomb avec l'acide azotique.

Le caoutchouc s'altère rapidement et devient cassant ; aussi dans la disposition des appareils, faut-il renoncer à l'emploi des tubes de cette nature.

L'ozone est facilement absorbé par les métaux. L'argent poreux se tranforme en une matière noire ; l'argent, le fer et le zinc se recouvrent d'une couche d'oxyde ; l'humidité toutefois est indispensable pour déterminer cette oxydation (Schœnbein, Marignac, Fremy, E. Becquerel, etc., etc.).

L'ozone ne paraît subir aucune altération de la part de l'eau, de l'acide sulfurique concentré, de l'ammoniaque ou de l'eau de baryte.

4° L'étincelle électrique qui se manifeste lors de la rupture des circuits voltaïques forme un véritable arc voltaïque contenant des molécules de platine très-divisé. Cet arc ne communique pas à l'oxygène un pouvoir oxydant particulier et ne le rend pas odorant ; mais, en agissant à la fois comme mousse de platine et comme électricité, il peut déterminer rapidement des combinaisons de gaz entre eux : sous son influence, on a pu combiner directement l'azote à l'oxygène pour former de l'acide azotique, l'azote à l'hydrogène pour produire de l'ammoniaque, l'acide sulfureux à l'oxygène pour engendrer l'acide sulfurique.

5° Les étincelles produites par un appareil d'induction électrique qui sera décrit plus tard agissent exactement comme celles des machines ordinaires; elles rendent l'oxygène odorant, et permettent, en prenant certaines précautions, de répéter toutes les expériences qui sont faites au moyen de la machine ordinaire.

6° L'oxygène pur et sec enfermé dans des tubes de verre, en même temps qu'une bande de papier amidonné et ioduré, a pu être électrisé par influence, au moyen d'une série d'étincelles venant lécher extérieurement la surface du tube. Le papier a commencé à bleuir après le passage de quelques étincelles. Cette coloration tient à l'électrisation de l'oxygène, et non pas à la décomposition de l'iodure; car aucun effet n'a lieu dans l'hydrogène pur placé dans les mêmes conditions. Ce fait est d'autant plus remarquable, que l'oxygène est ici électrisé sans l'intervention de fils métalliques, et, par conséquent, hors de la présence de particules transportées par l'étincelle électrique.

7° L'oxygène préparé par les méthodes les plus diverses, telles que la calcination des oxydes de manganèse, de mercure et d'argent, la décomposition du chlorate de potasse, celle de l'eau au moyen de la pile, acquiert des propriétés oxydantes très-marquées, lorsqu'on l'a soumis à l'influence de l'électricité. Ces propriétés se manifestent sur de l'oxygène qui a été chauffé au rouge et soumis aux modes de purification les plus énergiques.

L'oxygène odorant provenant de la pile, qui perd ses propriétés oxydantes après l'action de l'iodure de potassium, peut reprendre son activité chimique et son odeur, lorsqu'on le soumet à l'action de l'étincelle électrique. Cette expérience peut être répétée sur le même gaz un grand nombre de fois.

Tous ces faits démontrent que le pouvoir oxydant de l'oxygène électrisé n'est pas dû à la présence d'un corps étranger contenu dans ce gaz.

8° Lorsqu'on enferme dans une série de tubes de verre de l'oxygène pur et sec, qu'on soumet le gaz à l'action de l'étincelle électrique, et qu'on casse ensuite une des extrémités de ces tubes pour reconnaître le volume de gaz qui est devenu immédiatement absorbable par l'iodure alcalin, on reconnaît que, pendant plusieurs heures, la modification augmente proportionnellement au temps de l'électrisation, et qu'ensuite elle paraît diminuer, parce que l'étincelle détruit probablement l'action qu'elle produit d'abord. Ainsi, l'oxygène pur et sec devient odorant et actif sous l'action de l'élec-

tricité; mais l'effet ne se développe que sous l'influence d'une certaine quantité d'eau introduite ultérieurement.

9° Lorsqu'on étudie l'action de l'oxygène électrisé sur certains corps absorbants (iodure de potassium, mercure humide, etc.), pouvant s'emparer immédiatement de l'oxygène qui a subi l'influence électrique, et soustraire ce gaz à l'action décomposante d'un excès d'électricité, on voit alors que l'oxygène est absorbé d'une manière régulière à mesure que le nombre des étincelles électriques qui le traversent augmente; si l'action est suffisamment prolongée, ce gaz peut même présenter une absorption complète.

Afin de démontrer que l'azote atmosphérique qui peut s'introduire dans les tubes eudiométriques n'exerce aucune influence sur les absorptions que nous avons signalées, on a introduit dans des tubes pleins d'oxygène pur de l'iodure de potassium et de l'argent humides, puis on a sondé leurs extrémités à l'aide du chalumeau. On a soumis ces tubes pendant plusieurs jours à l'action de l'électricité; l'étincelle, qui dans les premiers jours était d'abord très-brillante, est devenue de plus en plus pâle et bientôt presque invisible : à ce moment, en cassant les tubes sous l'eau, on a vu le liquide se précipiter dans l'intérieur et les remplir entièrement, ce qui démontre que le vide s'y était produit, et que par conséquent l'oxygène était devenu entièrement absorbable à froid par l'argent et les iodures alcalins. On doit ajouter que, pour rendre cette expérience décisive, on avait reconnu d'abord que l'eau, les parois du verre et les fils de platine ne pouvaient pas absorber l'oxygène; que l'eau n'est pas nécessaire pour développer l'activité de l'oxygène, mais bien pour faire réagir l'oxygène électrisé sur l'iodure; et que, de plus, l'iodure de potassium n'est pas décomposable par l'influence de l'étincelle électrique.

Les conclusions précédentes depuis le n° 4, proviennent de la même suite de recherches (Fremy et E. Becquerel).

Comment l'étincelle électrique agit-elle sur l'oxygène? produit-elle une électrisation permanente des molécules de ce gaz, ou bien détermine-t-elle une modification isomérique? Ces questions sont difficiles à résoudre et sortent du domaine de l'expérience. On peut seulement rapprocher les propriétés remarquables qu'acquiert l'oxygène, par l'action des étincelles électriques, de la faculté que possède ce gaz de devenir magnétique sous l'action des aimants, comme on le verra dans le troisième volume. Ces effets magnétiques, qui sont exagérés dans l'oxygène, quand on les compare à

ceux qui sont produits par les autres gaz, semblent indiquer que l'oxygène peut être modifié par l'électricité plus facilement que les autres fluides aérifiques.

Nous avons exposé avec détails les différents résultats obtenus avec l'oxygène électrisé, en raison de l'importance du sujet; du reste, ce corps est le seul dans lequel on ait observé jusqu'à présent des effets de ce genre.

CHAPITRE III.

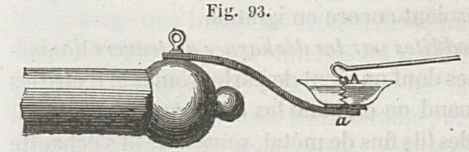
Effets calorifiques.

Les effets calorifiques et lumineux dont nous allons parler doivent être rangés parmi les effets physiques dus à l'action de l'électricité; mais, en raison de l'étendue que nous avons consacrée à leur étude, nous les avons exposés dans deux chapitres séparés.

Action calorifique de l'étincelle électrique. Les effets calorifiques produits par l'électricité sont très-variés, et on les observe toutes les fois que l'électricité est transmise au travers des corps. D'abord, le passage de l'étincelle électrique dans l'air est accompagné d'effets calorifiques, comme il est facile de le prouver à l'aide des expériences suivantes.

En faisant éclater l'étincelle au travers de l'alcool ou de l'éther, on enflamme ces liquides; on les place pour cela dans un petit vase en verre ayant au fond un bouton métallique *a* communiquant au manche également en métal en relation avec un conducteur de machine électrique.

Fig. 93.



L'appareil est disposé de manière que l'étincelle éclate entre le fond du vase et une boule A placée au-dessus du liquide: de cette façon l'étincelle est forcée de traverser l'alcool ou l'éther, et produit son inflammation. Elle agit

particulièrement sur le mélange d'air et de vapeur qui se trouve au-dessus de la surface du liquide.

Si l'on entoure la boule d'un excitateur à manche avec du coton saupoudré de résine pilée, et qu'en déchargeant une jarre ou une bouteille de Leyde on fasse éclater l'étincelle au milieu de ce mélange, la résine est enflammée.

On peut enflammer aussi d'autres corps combustibles, tels que la poudre à canon; c'est même à l'aide de cette propriété que l'on peut actuellement enflammer à distance les poudres des mines. L'appareil le plus commode est un appareil d'induction que nous décrirons dans le troisième volume.

Des mélanges de gaz capables de se combiner immédiatement donnent lieu à une explosion; le pistolet de Volta en est un exemple; il se compose d'un vase métallique que l'on peut fermer à l'aide d'un bouchon. On le remplit d'un mélange d'hydrogène et d'air, en l'exposant renversé sur un appareil à dégagement d'hydrogène; en approchant alors d'une machine électrique ou d'un électrophore la tige métallique qui traverse le vase, et qui est isolée de celui-ci par un tube de verre, on fait naître au milieu du mélange gazeux en *ab* une étincelle qui donne lieu à une explosion et à la projection du bouchon.

Fig. 94.

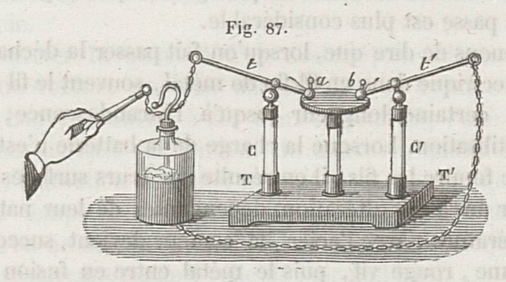


Une chandelle qui vient d'être éteinte est rallumée au moyen de l'action calorifique qui résulte du passage de l'étincelle dans le mélange de l'air avec le gaz émanant encore de la chandelle. Pour obtenir ce résultat, on place une chandelle enflammée de façon que la mèche soit placée entre les boules de l'excitateur universel représenté (fig. 87, page suivante); on éteint la chandelle, et on fait passer immédiatement après la décharge d'une bouteille de Leyde. Si l'expérience est faite convenablement, la chandelle se trouve rallumée; il est nécessaire pour le succès de l'expérience que quelques points de la mèche soient encore en ignition.

Actions calorifiques produites par les décharges au travers des métaux. Les effets calorifiques dont on vient de parler sont loin d'être les seuls que l'on observe quand on emploie les décharges électriques. Lorsque celle-ci traverse des fils fins de métal, souvent le fil s'échauffe sur une certaine longueur, jusqu'à l'incandescence, la fusion ou la volatilisation, suivant l'intensité de la décharge électrique. Pour montrer ce phénomène, on dispose entre les branches d'un exci-

tateur universel (fig. 87) un fil très-fin d'or ou de fer, et on fait

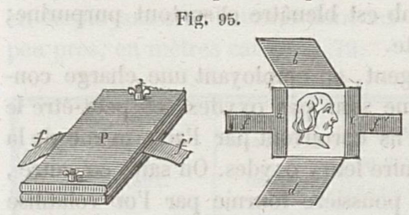
Fig. 87.



passer au travers une décharge à l'aide d'une batterie suffisamment puissante. Les fils de soie dorée présentent un phénomène curieux, qui montre avec quelle rapidité les molécules de matière conductrice sont saisies par l'électricité : l'or qui les recouvre est volatilisé sans que la chaleur soit capable de brûler la soie.

On se sert également des effets de fusion produits avec des lames minces d'or ou de platine, pour faire des empreintes électriques.

Fig. 95.



On emploie la presse électrique P formée de deux planches pressées l'une contre l'autre à l'aide de deux vis. Deux lames d'étain *f*, *f'*, sont disposées de façon à faire passer une décharge électrique d'un côté à l'autre entre les faces de la presse ; ces deux lames sont mises en communication avec les deux surfaces d'une batterie. Une lame d'or *ac* placée dans la presse sur une découpure peut être fondue, et donne alors l'empreinte de la découpure sur de la soie, du papier, etc., placé de l'autre côté de cette découpure.

On peut comparer le passage de l'électricité dans les métaux à celui d'un cours d'eau animé d'une certaine vitesse, qui trouve sur son passage une masse de sable dans lequel il peut s'étendre ; l'eau alors s'écoule dans les interstices sans déranger la position des grains de sable ; mais, si la quantité de mouvement dont ce cours d'eau est animé est assez considérable, alors la masse est rompue en divers points. De même aussi, quand l'électricité pénètre dans une masse métallique, si elle peut s'étendre sans difficulté, les molécules ne perdent pas leur position naturelle d'équilibre ; dans le cas contraire, il n'en est pas ainsi, et il en résulte des effets de

chaleur qui doivent être d'autant plus grands que la quantité d'électricité qui passe est plus considérable.

Nous venons de dire que, lorsqu'on fait passer la décharge d'une batterie électrique dans un fil fin de métal, souvent le fil s'échauffe dans une certaine longueur jusqu'à l'incandescence, la fusion ou la volatilisation. Lorsque la charge de la batterie n'est pas suffisante pour fondre les fils, il en résulte sur leurs surfaces des effets de couleur dus à des altérations dépendantes de leur nature et de leur température : avec l'acier, la couleur devient successivement bleue, jaune, rouge vif, puis le métal entre en fusion quand la charge devient plus forte; celle-ci augmentant encore, le métal disparaît avec une flamme brillante, et il se dépose sur une feuille de papier placée au-dessus une poussière fine et rouge de peroxyde.

Le fer brûle avec une lumière blanche très-vive; le zinc avec une flamme blanche mêlée de bleu et de rouge; l'étain en produit une d'un blanc bleuâtre; l'or et le cuivre sont dans le même cas; la flamme produite par le plomb est bleuâtre et surtout purpurine; enfin celle de l'argent est verte.

Avec le platine, l'or et l'argent, en employant une charge convenable, les deux premiers ne sont pas oxydés, et peut-être le troisième, car la chaleur qu'ils éprouvent par l'acte même de la fusion est suffisante pour réduire leurs oxydes. On sait, en outre, que la couleur violette de la poussière fournie par l'or volatilisé dans cette circonstance, est celle que prend ce métal quand il se trouve dans un grand état de division.

Un grand nombre d'expériences ont été faites pour opérer la fusion des fils métalliques dans l'air et dans différents gaz, au moyen des décharges électriques. L'appareil employé à cet usage est formé d'un tube de verre de 55 à 60 millimètres de diamètre et de 215 millimètres de longueur. Il est fermé à ses deux extrémités par deux douilles, à l'une desquelles est un robinet qui sert à faire entrer une quantité donnée d'air ou de tout autre gaz; au-dessus de ce robinet et dans l'intérieur du tube, se trouve une bobine sur laquelle sont enroulés un fil de métal et un fil de soie qui sont parallèles et attachés l'un à l'autre de décimètre en décimètre. Un cylindre de cuivre de 8 centimètres de long est vissé au centre de la douille supérieure; au moyen d'une longue aiguille, on fait passer le bout du fil de soie et le fil de métal à travers le cylindre; puis on le ferme avec un bouchon, de manière que le fil et la soie se meuvent dans le

tube. Quand le fil est brûlé, on lui en substitue un autre au moyen du fil de soie.

Pour constater la quantité d'air absorbé, on adapte à l'orifice inférieur du robinet un tube de verre étroit, ayant à peu près $0^{mm},27$ de haut, et ouvert à ses deux extrémités; l'une d'elles est plongée dans un vase qui contient du mercure; quand le robinet est ouvert, l'élévation du métal indique la quantité de gaz absorbé. Comme la température augmente beaucoup dans l'intérieur de l'appareil, on ne doit déterminer l'absorption que lorsque la température est devenue égale à celle de l'air ambiant.

En opérant dans l'air, les métaux oxydables absorbent de l'oxygène. Les métaux qui conduisent le moins l'électricité, tels que le fer, le platine, produisent les plus grands effets de chaleur; tandis que l'or et l'argent, qui sont bons conducteurs, donnent des effets moins marqués.

Voici le tableau des différents résultats obtenus dans l'air par Cuthberson avec des fils de différents métaux, de $0^{m},27$ de longueur, en employant une batterie dont les armures intérieures avaient à peu près, en mètres carrés, 1,79.

DÉSIGNATION des métaux.	DIAMÈTRE des fils.	CHARGE en grains de l'électromètre.	COULEUR de la poussière métallique recueillie.
Fil de plomb.......	$\frac{1}{90}$	20	Gris peu foncé.
— d'étain.........	$\frac{1}{90}$	30	Presque blanc.
— de zinc.........	$\frac{1}{90}$	45	Id.
— de fer..........	$\frac{1}{150}$	35	Brun rougeâtre.
— de cuivre.......	$\frac{1}{150}$	35	Brun tirant sur le pourpre.
— de platine......	$\frac{1}{150}$	35	Noir.
— d'argent........	$\frac{1}{150}$	48	Id.
— d'or............	$\frac{1}{150}$	40	Pourpre brunâtre.

Avec la grande machine du musée de Teyler, à Harlem, Van Marum est parvenu à fondre un fil de fer de 16 mètres de longueur. Cette machine est à deux plateaux; chacun d'eux a un diamètre de $1^{m},75$; l'électricité qu'elle fournit a une tension telle, que ni des cordons de soie de 14 mètres de longueur, ni des supports de verre de $1^{m},53$ de hauteur, quoique très-secs, ne peuvent suffisamment

isoler une aussi grande quantité d'électricité que celle dont le conducteur est chargé.

Cuthberson et d'autres physiciens ont mesuré avec des électromètres assez grossiers l'action calorifique produite par la décharge d'une batterie, en prenant pour mesure la longueur d'un fil fondu d'un diamètre donné; ils ont trouvé que cette action était à peu près comme le carré de la charge des batteries pour certaines longueurs de fil. Cette loi cependant varie suivant l'épaisseur des jarres qui composentla batterie, les plus épaisses produisant, comme on le conçoit très-bien, des effets calorifiques moindres. Cavendish a observé que la quantité d'électricité nécessaire pour charger au même degré différentes jarres ayant même surface armée, était en raison inverse de leur épaisseur.

Van Marum, ayant pris des fils de différents métaux et de même diamètre, a cherché quelle longueur du même fil pouvait être fondue avec une charge égale; il a trouvé que le fil de plomb était fondu sur une longueur de 120 pouces, le fil d'étain 120 pouces, le fer 5 pouces, l'or 3 pouces et demi; les fils d'argent, de cuivre rouge, ne furent pas fondus à un quart de pouce. En essayant de fondre des fils de plomb d'une plus grande longueur, de 13 pieds (anglais) par exemple, il a reconnu que quelques-uns avaient été fondus en plusieurs morceaux; l'un d'eux fut réduit en plus de trente parties, et un fil d'étain, soumis à la même expérience, en plus de cent. Les expériences de fusion ayant été faites dans l'azote, le plomb donna une poussière fine; l'étain et le fer furent réduits en petits globules.

En opérant dans l'eau avec des fils de fer d'une certaine longueur, de $\frac{1}{150}$ de pouce (anglais) de diamètre, le fil fut simplement fondu; l'expérience ayant été répétée avec un fil moins long, le fer fut dissipé en vapeur, et il se dégagea plusieurs bulles de gaz annonçant que l'eau avait été décomposée; le plomb produisit des effets analogues.

M. Harris, en cherchant les effets des décharges dans le vide ou dans l'air raréfié, a trouvé que des fils très-fins de métal sont fondus plus difficilement dans le vide que dans l'air à la pression ordinaire: il a fait passer la décharge d'une batterie de 25 pieds anglais carrés à travers un fil de fer renfermé dans un tube bien épuisé d'air, sans que le fil fût affecté sensiblement. L'électricité surabondante paraissait trouver un passage plus facile à travers l'air raréfié à la surface, d'où résultait un effet très-brillant. En faisant rentrer l'air,

le fil fut aussitôt fondu, bien que l'on n'employât que le cinquième de la surface armée.

M. Riess, pour étudier l'échauffement des fils métalliques par suite du passage de décharges électriques, a introduit ces fils dans l'intérieur d'un thermomètre à air, et, après la décharge qui avait échauffé le fil, et par conséquent l'air intérieur, il a conclu de la dilatation de l'air la quantité de chaleur produite; il est ainsi arrivé aux lois suivantes :

« 1° Quand la même quantité d'électricité, complétement déchargée dans le même intervalle de temps, traverse des fils de même longueur, mais de dimensions différentes, chaque fil éprouve une élévation de température indépendante de sa longueur, et réciproquement proportionnelle à la quatrième puissance de son rayon.

« 2° L'échauffement d'un fil par la décharge électrique est réciproquement proportionnel à la durée de la décharge ; le retard que la décharge éprouve par l'insertion d'un fil dans le circuit est en raison directe de la longueur du fil et en raison inverse du carré de son rayon.

« 3° L'élévation de température dans la section normale d'un fil homogène qui est inséré dans le circuit d'une batterie électrique, et qui est en raison inverse de la quatrième puissance de son rayon, est en raison directe de la quantité d'électricité accumulée divisée par le temps de la décharge (*).

(*) M. Riess a déduit d'expériences en apparence compliquées les formules générales sur l'échauffement électrique. Qu'on imagine des fils quelconques soudés bout à bout, qui composent le fil conjonctif constant de la batterie, et qu'on y ajoute un fil quelconque, on pourra varier les expériences sur l'échauffement de ces fils par la décharge de la batterie de deux manières différentes : premièrement, en laissant le fil ajouté constant, et en examinant l'échauffement de chacun des autres fils du circuit; secondement, en n'examinant que l'échauffement d'un fil déterminé, mais en variant le fil ajouté. Il a également fait varier la surface de la batterie et la quantité d'électricité qu'on y a accumulée. Toutes ces expériences diverses peuvent être embrassées par une seule formule. Soient T, l'élévation de température d'un fil dont l est la longueur et r le rayon, C la chaleur spécifique de son métal, g son poids spécifique, et x' sa résistance (égale à la valeur réciproque de sa conductibilité électrique) ; supposons qu'on ajoute un fil conjonctif composé, un fil de la longueur λ, ayant pour rayon ρ d'une résistance x; soient enfin la surface de la batterie désignée par S, et sa quantité d'électricité par q; on aura :

$$T = \frac{ax'}{r^4 Cg}\left(\frac{1}{1+\frac{b\lambda x}{\rho^2}}\right)\frac{q^2}{S}.$$

a et b sont deux constantes déterminées par des expériences préalables. Dans

Diminution de longueur des fils métalliques soumis à l'action des décharges électriques. Lorsque la charge d'une batterie électrique n'est pas suffisante pour fondre un fil métallique d'un petit diamètre, il se produit des effets intéressants à connaître et que nous allons indiquer. Si l'on fait passer une très-forte décharge à travers des fils très-fins de fer et d'argent trop longs pour être fondus, leur longueur est diminuée sans que leur poids le soit ; ce qui semble indiquer une diminution dans le sens de la longueur et une augmentation de diamètre (Nairne).

Au lieu d'étendre celui-ci entre les deux pinces d'un excitateur

cette formule tout à fait empirique, on distingue deux termes différents : le terme $\frac{ax'}{r^4Cg}$, qui donne l'échauffement du fil examiné, tout le fil conjonctif restant constant, et le terme $\frac{b\lambda x}{\rho^2}$, qui exprime la variation que cet échauffement éprouve par l'introduction du fil accessoire. En suivant l'analogie, on peut regarder cette variation comme résultant d'un retard de la décharge de la batterie ; d'après cela, le terme $\frac{bx\lambda}{\rho^2}$ sera le retard produit par le fil ajouté, et la quantité x, la résistance de son métal. En multipliant les deux membres de l'équation précédente par lr^2Cg, on obtient, pour la quantité de chaleur W qui est développée dans le fil examiné, l'expression très-simple :

$$W = \frac{alx'}{r^2}\left(\frac{1}{1+\frac{b\lambda x}{\rho^2}}\right)\frac{q^2}{S}.$$

De là on tire la conclusion :

« Les quantités de chaleur développées dans les fils divers qui composent le fil « conjonctif sont inversement proportionnelles aux retards que ces mêmes fils pro- « duisent dans une décharge quelconque, si on les ajoute un à un et isolément à « un autre fil conjonctif. »

On peut appliquer ces deux équations au cas qui se présente le plus souvent, où l'on se sert d'un fil unique pour opérer la décharge de la batterie. Soit un fil de métal de la longueur λ du rayon ρ, x désignant la force retardatrice, C la chaleur spécifique, g le poids spécifique de son métal, S la surface de la batterie, q la quantité d'électricité accumulée ; la température T et la quantité de chaleur développée W, ou la quantité de glace fondue par le fil, sont données par les équations :

$$T = \frac{a}{\rho^2Cg}\cdot\frac{1}{\frac{\rho^2}{x}+b\lambda}\cdot\frac{q^2}{S}. \qquad W = \frac{a'}{\frac{\rho^2}{x\lambda}+b}\cdot\frac{q^2}{S}.$$

M. Riess est arrivé à l'aide de ses expériences aux expressions des quantités $\frac{1}{x}$ qui expriment les pouvoirs conducteurs des métaux.

Si l'on remarque en outre que le temps de la décharge est $\left(1+\frac{bx\lambda}{\rho^2}\right)\frac{S}{q} = z$, on aura $W = a'x\lambda\,\frac{q}{\rho^2 z}$. et la température $T = M\,\frac{q}{\rho^4 z}$.

M est un coefficient constant dépendant de a' et des dimensions et de la nature de fil métallique ; ces formules renferment les lois énoncées plus haut.

universel, on peut le suspendre verticalement, l'une des extrémités étant fixée entre les branches d'une pince, et l'autre servant à soutenir un poids pour tendre légèrement le fil : ce poids doit alors reposer sur un support en cuivre, à pieds mobiles, qu'on peut élever ou abaisser à volonté. On a reconnu qu'en opérant ainsi avec des fils de platine, les diminutions sont sensiblement proportionnelles au rapport inverse du cube des diamètres des fils (Ed. Becquerel).

On a disposé sous une cloche des fils de platine de $0^{mm},072$ de diamètre et de 183^{mm} et 345^{mm} de longueur, dont la partie supérieure communiquait à une tige isolée traversant une boîte à cuir; en faisant alors passer dans le vide fait à une pression de 5 millimètres, la décharge d'une batterie de dix-huit bocaux à travers ces fils, on a trouvé que la diminution moyenne était de 0,013 de la longueur du fil; or, pour un fil de platine de même diamètre, on avait trouvé $0^{m},011$ pour cette diminution dans l'air à la pression ordinaire. On peut donc conclure de là que celle-ci ne paraît pas influer sur la production du phénomène (Ed. Becquerel).

En soumettant un fil de platine de $0^{mm},072$ de diamètre à des décharges électriques successives, capables de le faire rougir sans fondre, on a remarqué qu'à la troisième ou quatrième décharge il n'est plus droit comme auparavant et il devient ondulé. A mesure que les décharges se succèdent, les parties ondulées augmentent de grandeur, sans jamais disparaître pour faire place à d'autres; en diminuant ensuite un peu la longueur du fil et faisant passer une nouvelle décharge, il ne se forme plus de nouvelles ondulations; mais elles augmentent encore, quelle que soit la force de la décharge; si l'on tient le fil tendu, la traction empêche l'effet d'être produit. Il semblerait résulter de cette expérience que le fil, par l'effet du passage de l'électricité, éprouve un mouvement ondulatoire dans le sens transversal, dont la vitesse est si grande que le fil conserve les ondulations produites par le passage de l'électricité dans les premiers instants (Ed. Becquerel).

Effets calorifiques produits par les courants électriques dans les fils métalliques homogènes. Lorsqu'un courant électrique d'une intensité suffisante circule dans un fil conducteur homogène, il se manifeste aussitôt une élévation de température égale dans tous les points du fil.

Lorsqu'on fait usage de faibles courants électriques, et que les variations de température sont très-petites, il suffit de placer le fil

traversé par le courant et tendu longitudinalement entre les mâchoires d'une pince thermo-électrique ; les moindres variations dans la température du fil sont immédiatement accusées par les déviations de l'aiguille aimantée d'un galvanomètre parcouru par le courant électrique produit dans la pince thermo-électrique qui sera décrite plus loin. Peltier, en opérant ainsi, a reconnu que, quelque faible que soit le courant qui circule dans le fil, il y a élévation de température ; que la chaleur est la même dans toute la longueur du fil, à l'exception des extrémités où elle augmente ou diminue selon que les fils de jonction sont moins bons ou meilleurs conducteurs que le métal du fil.

On peut également manifester l'effet calorifique produit par un courant électrique faible en faisant passer ce courant dans l'hélice d'un thermomètre métallique de Bréguet ; aussitôt que le courant circule, la déviation de l'aiguille indique l'élévation de la température (Delarive).

Quand les courants sont plus énergiques, l'élévation de température est plus considérable ; si les fils sont assez fins, alors ils peuvent fondre ou rougir. Pour donner une idée des grands effets de chaleur produits par le passage de l'électricité dans les métaux, nous rapporterons les effets obtenus par Children avec une pile à la Vollaston dont les couples avaient des dimensions considérables ; chaque plaque de zinc avait 2 mètres de long et 0^m,8 de large, et chaque plaque de cuivre avait une surface double. Le nombre des couples était tel qu'il fallait vingt-un compartiments présentant une capacité d'au moins 3,500 litres. Deux cylindres de plomb étaient soudés aux deux pôles, et plongeaient par leurs extrémités libres dans des bains de mercure séparés. Il a commencé par déterminer la facilité avec laquelle différents métaux entrent en ignition quand ils font partie du même circuit. Il s'est servi à cet effet de deux fils de nature différente qui avaient l'un et l'autre 0^m,21 de longueur et 1 millimètre environ de diamètre. Chacun d'eux, d'une part, était en contact avec le mercure, et, de l'autre, était recourbé de manière à pouvoir s'accrocher l'un à l'autre. En chargeant l'appareil avec de l'eau renfermant $\frac{1}{40}$ d'acide, il obtint les effets suivants :

Fils de platine et d'or.........	Ignition du platine.
Fils d'or et d'argent..........	Ignition de l'or.
Fils d'or et de cuivre.........	Ignition des deux.

Fils d'or et de fer...........	Ignition du fer.
Fils de platine et de fer.......	Ignition du fer, et quelque temps après du platine.
Fils de platine et de zinc.......	Ignition du platine, et quelquefois fusion du zinc.
Fils de zinc et de fer.........	Ignition du fer, échauffement du zinc sans fusion.
Fils de plomb et de platine.....	Fusion du plomb dans son point de conctact avec le platine.
Fils d'étain et de platine......	Fusion de l'étain au point de contact.
Fils de zinc et d'argent........	Ignition du zinc avant d'être fondu.
Trois paires de fils de platine et d'argent..................	Ignition des fils de platine.
Un fil de zinc entre deux de platine.........................	Ignition des fils de platine.

Nous voyons par ces résultats que, des deux fils soumis à l'expérience, celui qui rougit est précisément le moins bon conducteur de l'électricité, et que, lorsqu'on expérimente avec des fils mauvais conducteurs, c'est précisément aux points de contact où l'électricité éprouve le plus de résistance que l'ignition se manifeste.

Ayant chargé ensuite sa pile avec un liquide composé d'eau et de $\frac{1}{20}$ de son poids d'un mélange d'acide azotique et d'acide sulfurique, et soumis à l'expérience des fils de platine de différentes longueurs et de différents diamètres, il a obtenu les résultats suivants :

Fil de platine de $1^m,81$ de long et de 3 millimètres de diamètre : il est devenu rouge dans toute sa longueur;

Fil de platine de $2^m,80$ et de 12 millimètres de diamètre : il s'est échauffé jusqu'au rouge ;

Tige de platine de 5 millimètres en carré et de $0^m,06$ de long : elle s'est échauffée au rouge et a fini par entrer en fusion.

En plaçant de l'iridium ou de l'alliage d'iridium et d'osmium au fond d'une petite cavité pratiquée dans un morceau de charbon bien recuit et flottant à la surface du mercure dans l'un des bassins, et fermant le circuit avec un morceau de charbon en communication avec l'autre bassin au moyen d'un gros fil de cuivre, il obtint les effets suivants avec la pile fortement chargée : l'iridium

se fondit en globules pesant $0^{gr},37$ et renfermant encore quelques cavités. Dans cet état, il était brillant et avait une densité égale à 18,68. L'alliage d'iridium et d'osmium se fondit aussi en globules.

On peut se servir, pour mesurer la quantité de chaleur dégagée par le passage des courants électriques dans un fil métallique, d'un procédé analogue à celui que MM. Delaroche et Bérard ont employé pour mesurer les chaleurs spécifiques des gaz. Pour arriver à ce résultat, ils faisaient circuler dans le serpentin d'un calorimètre un courant constant de gaz à la même pression, élevé à une température également constante; ce gaz cédait une partie de sa chaleur à l'eau du calorimètre, et il arrivait un moment où la température de ce calorimètre était stationnaire: ce moment était celui où, dans un même temps, la quantité de chaleur perdue par refroidissement était la même que celle fournie au calorimètre par suite du passage du gaz dans le serpentin.

Au lieu d'un courant constant de gaz, on a employé un courant constant d'électricité, et on a substitué au serpentin un fil métallique enroulé autour d'une spirale de verre plongeant dans un petit calorimètre. Le courant électrique élève la température de l'eau du calorimètre, et, à l'aide d'un thermomètre très-sensible, on peut avoir sa température. Il arrive nécessairement un moment où cette température est stationnaire; à cet instant, si l'on arrête l'expérience, que l'on note la vitesse de refroidissement en se servant de la loi de Newton, qui est exacte pour des températures peu élevées, on a la quantité de chaleur fournie dans un temps donné par le courant, en calculant la quantité de chaleur perdue par le calorimètre pendant ce même temps, si la température reste stationnaire. Ce procédé, comme on le voit, est susceptible d'une grande exactitude (E. Becquerel).

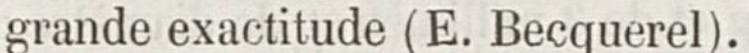
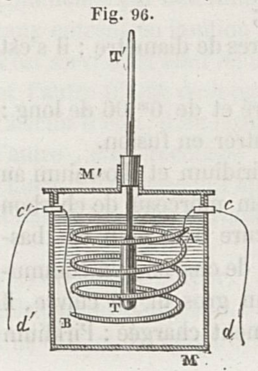


Fig. 96.



La figure 96 représente le calorimètre servant à mesurer la quantité de chaleur dégagée par le passage du courant. Le calorimètre MM' est en cuivre mince et rempli d'eau; son couvercle est muni d'une tubulure à l'aide de laquelle on place un thermomètre TT' très-sensible dans son intérieur; les côtés sont percés en c et c' de deux ouvertures qui permettent de fixer deux petits tubes de verre dans lesquels passent deux fils de cuivre cd, $c'd'$

servant à établir la communication du fil AB que l'on dispose dans l'intérieur du calorimètre, avec la pile. Le fil intérieur AB est enroulé autour d'un tube de verre contourné de sorte que les nombreuses spires isolées les unes des autres forment en définitive une longueur assez grande de fil dans l'intérieur du petit calorimètre.

Connaissant le poids de l'eau, la chaleur spécifique du calorimètre, celle du thermomètre et du fil, il est facile d'en conclure la quantité de chaleur produite dans un temps donné par suite du passage de l'électricité dans le fil (E. Becquerel).

On arrive ainsi aux lois suivantes :

1° La quantité de chaleur dégagée par le passage d'un courant électrique dans un fil métallique est en raison directe du carré de la quantité d'électricité qui passe dans un temps donné.

2° Elle est en raison directe de la résistance à la conductibilité de ce fil, ou en raison inverse du pouvoir conducteur.

Ces lois sont les mêmes que lors du passage de l'électricité libre dans les fils métalliques (Joule, E. Becquerel, Botto, etc.) (*).

(*) En appelant M la quantité de chaleur dégagée par rapport à celle qui élève de 0 à 1°, 1 gramme d'eau ; Q la quantité d'électricité qui passe, mesurée en prenant pour unité la quantité qui, en décomposant l'eau, donne par minute 1 centimètre cube de mélange d'hydrogène et d'oxygène ramené à 0° et à $0^{m},76$ de pression, correction faite de la vapeur d'eau ; R la résistance à la conductibilité du conducteur, on a :

$$M = ARQ^2,$$

A étant un coefficient constant.

D'après les expériences, avec un fil de platine de 1 mètre de longueur et de 1 millimètre de diamètre on aurait :

$$M = 0{,}01969Q^2.$$

Avec ce nombre, et à l'aide des coefficients de résistance donnés page 85, en ayant égard à la longueur et au diamètre de fil, on peut avoir la quantité de chaleur dégagée dans un fil quelconque.

Ayant la quantité de chaleur dégagée, il est aisé de trouver l'élévation de température développée en chaque point d'un fil métallique, s'il n'y avait pas de déperdition. Introduisons dans l'expression de M la conductibilité qui est fonction du coefficient de conductibilité C, de la longueur L et du diamètre D du fil, on aura :

$$M = \frac{A}{C} \cdot \frac{L}{D^2} Q^2.$$

Soit t l'élévation de température de chaque point au-dessus de celle du milieu ambiant, d la densité du fil, γ sa chaleur spécifique ; on arrive à l'équation :

$$t = \frac{4A}{\pi C \gamma d} \cdot \frac{Q^2}{D^4},$$

formule indépendante de la longueur L. On voit par là que :

1° Quelle que soit la longueur d'un fil métallique, pourvu que son diamètre

Fils plongés dans différents milieux. Il est facile de démontrer l'influence de la chaleur sur la conductibilité des fils, et par suite sur l'échauffement du fil lui-même.

Des expériences de Davy, répétées depuis, et qui semblent paradoxales, vont mettre le fait en évidence. Lorsqu'un fil rougit à l'air par suite du passage d'un courant énergique, si l'on place ce fil dans un liquide capable de le refroidir, l'eau, l'alcool, l'huile, il cesse d'être rouge, et la quantité d'électricité qui passe devient plus considérable. Ce résultat est dû à ce que, le fil étant à basse température, sa résistance à la conductibilité est moindre. (Voir p. 87.) Un fil étant rougi par un courant dans toute sa longueur, si l'on applique un morceau de glace sur une portion du fil rouge ou qu'on y dirige un courant d'air froid, toutes les autres parties du fil passent du rouge au rouge blanc. En effet, en refroidissant

soit constant, s'il passe la même quantité d'électricité dans ce fil, l'élévation de température en chaque point sera toujours la même.

Cette loi a été observée par Peltier à l'aide de la pince thermo-électrique.

2° L'élévation de température est, toutes choses égales d'ailleurs, en raison inverse de la quatrième puissance du diamètre.

Ces deux lois sont les mêmes que pour l'électricité statique. Comme les inconnues sont L, D, Q, toutes quantités facilement observables, et $\frac{A}{C}$ dont nous avons donné la valeur pour le platine, qui peut être trouvé pour chaque espèce de fil en connaissant C, on peut immédiatement trouver l'élévation de température d'un fil quelconque, en supposant qu'il n'y ait pas perte par le refroidissement dans l'air.

Pour le fil de platine de 1 millimètre de diamètre on aurait

$$t = 0°,036859Q^2,$$

et pour un fil de $\frac{1}{10}$ de millimètre de diamètre

$$t = 368°,59Q^2.$$

Q exprimant en centimètres cubes le mélange de gaz provenant de la décomposition de l'eau produite par le courant.

Il est facile d'indiquer, d'après les lois précédentes, quel est le maximum de chaleur dégagée par une pile d'une résistance déterminée dans un fil métallique extérieur. Soient R et r les résistances de la pile et du fil, i l'intensité du courant électrique. On a d'après la formule de la pile $i = \frac{E}{R+r}$. Or la quantité de chaleur dégagée dans le fil étant proportionnelle à i^2 et à r, on aura, m étant un coefficient constant :

$$Q = \frac{mE^2r}{(R+r)^2}.$$

Or, si r varie, Q est susceptible d'un maximum lorsque $r = R$. Cela revient à dire que si l'on prend un fil métallique dont la résistance soit égale à celle de la pile, celle-ci développe dans le fil extérieur le maximum de chaleur qu'elle peut produire (E. Becquerel).

une portion du fil, on diminue sa résistance, on augmente la conductibilité du système, et dès lors, la quantité d'électricité qui passe étant plus grande, les autres portions du fil augmentent de température.

Les résultats obtenus par M. Grove en plongeant les fils dans différents gaz peuvent s'expliquer de la même manière. Il a trouvé que des fils égaux développaient dans différents gaz des quantités de chaleur différentes, et que dans l'hydrogène la quantité de chaleur dégagée était plus forte que dans d'autres milieux. Cela tient sans doute à ce que les fils métalliques se refroidissent inégalement vite dans les différents gaz, et qu'ayant alors des températures différentes, quoique de même nature, ils ne présentent pas la même résistance à la conductibilité.

Fig. 97.

L'expérience suivante de M. Grove vient à l'appui de cette explication : on place une hélice en fil de platine S à l'extrémité de deux fils de cuivre *ab*, *a'b'*; puis on fait passer à l'aide de deux ou trois couples dans les fils et dans l'hélice, un courant électrique capable de maintenir celle-ci au rouge sombre dans l'air. Si l'on place alors sur le système une cloche AB remplie de gaz hydrogène, quand l'hélice S est au milieu du gaz, elle n'est plus maintenue au rouge; en enlevant la cloche au moment où l'hélice se retrouve dans l'air, elle redevient rouge. La même quantité d'électricité qui passe dans l'hélice ne donne donc pas lieu aux mêmes effets calorifiques; cela se conçoit : le refroidissement étant plus rapide dans le gaz hydrogène, la température du platine est moindre, sa résistance à la conductibilité l'est également, et par conséquent il se comporte comme un fil de platine plus gros lorsqu'il est plongé dans le gaz hydrogène que lorsqu'il est environné d'air. On peut faire une expérience analogue en plaçant dans l'axe d'un tube de verre un fil de platine et le faisant traverser par un courant électrique capable seulement de le porter au rouge sombre; si l'on fait alors circuler dans le tube un courant d'hydrogène et qu'on mette de nouveau le fil dans le circuit voltaïque, il ne rougira plus. En introduisant l'air, comme précédemment, la température rouge est de nouveau atteinte.

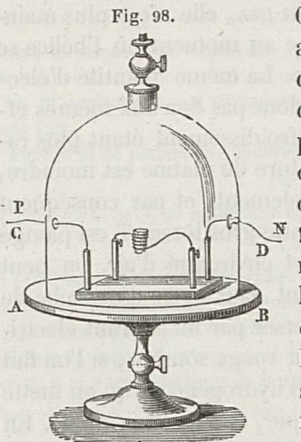
Emploi de l'élévation de température des fils pour obtenir des fusions. Il est facile de comprendre également qu'en s'opposant au refroidissement d'une certaine étendue d'un fil métallique, sa température s'accroît. Ainsi, lorsqu'on enroule une partie d'un fil de

platine en hélice, de façon que les spires ne se touchent pas, un courant électrique peut porter au rouge la portion du fil qui est enroulée, alors que les parties longitudinales attenantes quoique échauffées, restent sombres. En effet, ces parties longitudinales se refroidissent plus vite que les parties de spires voisines l'une de l'autre.

Cette propriété des hélices a été mise à profit comme il suit pour obtenir des fusions. Le fil de platine tenu en incandescence par le passage continu d'un courant provenant d'une pile à courant constant est reployé en hélice conique; une partie du rayonnement s'opère dans l'intérieur de cette hélice, qui acquiert une température excessive, capable de produire des effets de fusion. Le diamètre de la base de la spire peut varier depuis 2 jusqu'à 10 millimètres et même au delà, selon l'intensité du courant. On emploie habituellement une pile composée de 10 à 20 couples à courant constant. Le diamètre du fil peut varier de $\frac{1}{3}$ à $\frac{1}{2}$ millimètre.

L'hélice devenant le foyer de chaleur, on place dans son intérieur les creusets destinés à contenir les substances soumises à l'action de la chaleur. Ces creusets sont en charbon, en platine, en argent ou en porcelaine, suivant la nature des effets que l'on veut produire. On dispose le système sous une cloche, ainsi que le représente la figure 98, pour que l'on puisse opérer dans le vide ou dans un gaz quelconque. Pour former le petit creuset on prend un morceau de charbon que l'on taille en cône, et dont on évide l'intérieur afin d'y placer la substance d'essai. Dès l'instant que le courant circule, si l'expérience a lieu dans l'air, le charbon entre en combustion, ce qui produit un dégagement de chaleur tel, que l'hélice, le charbon et la substance d'essai sont à la température rouge blanc. Si la substance est un sulfate alcalin, quelques instants suffisent pour effectuer sa transformation en sulfure, comme il facile de le constater en plaçant le produit sur une pièce d'argent nouvellement décapée, avec une goutte d'eau : la pièce est noircie immédiatement. Si le creuset renferme un flux alcalin, la cendre provenant de la combustion du charbon se fond avec le flux,

Fig. 98.



et forme une enveloppe vitreuse mince qui entoure les spires du fil.

Veut-on encore augmenter la température, on place sous l'hélice une lampe à alcool dont la flamme enveloppe entièrement le creuset. La chaleur devient souvent si intense, qu'elle fond quelquefois des fils de platine d'un assez gros diamètre. Les creusets de platine doivent être formés d'une feuille très-mince de ce métal, et appliqués dans l'hélice de manière à ne la toucher que dans quelques points seulement. On peut, pour éviter le contact, placer une couche très-mince de verre. Les creusets de porcelaine sont à parois très-minces, et doivent être faits sur le modèle des petites coupelles de M. Lebaillif, avec cette différence toutefois que celles-ci sont plates, et que les creusets ont la forme qui leur est propre.

Outre l'hélice, on emploie aussi des spirales à spires plus ou moins serrées, sur lesquelles on pose les coupelles capsules, etc.

Si l'on ne veut pas augmenter l'incandescence avec une lampe à alcool, on entoure l'hélice d'un cylindre de platine poli intérieurement, qui réfléchit la chaleur sur le creuset (Becquerel).

Effets de chaleur produits lors du passage de l'électricité d'un métal dans un autre métal. Lorsqu'un fil est homogène, les phénomènes calorifiques sont les mêmes dans une section quelconque; mais si la résistance vient à augmenter ou à diminuer en un point, alors la température s'accroît ou se maintient plus bas que précédemment. L'augmentation de température est donc un indice de l'augmentation de résistance. C'est, en effet, ce qui arrive lorsqu'un courant circule à travers deux fils de même substance juxtaposés bout à bout en les faisant toucher ensemble: si ces fils ont le même diamètre, on observe en général, aux points de jonction, une élévation de température plus considérable que dans les autres parties du fil; mais, si on les soude ou que le contact soit bien établi, alors cet excès de température disparaît, et les effets calorifiques sont partout les mêmes.

Il résulte des observations faites, que lorsque les deux fils de même nature sont décapés et se touchent au moins dans une étendue égale à la section du fil, alors il n'y a pas augmentation de résistance au point de jonction.

Si les fils ne sont pas de même nature, quoique de même diamètre, les phénomènes ne sont plus les mêmes; ils se compliquent des effets qui résultent du passage de l'électricité d'un corps dans un autre. Peltier s'est servi, pour faire ces observations, de l'ap-

Fig. 98 bis.

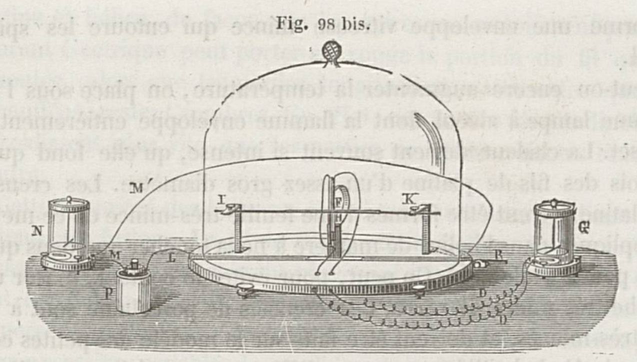
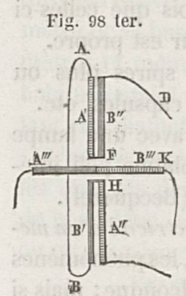


Fig. 98 ter.



pareil représenté figures 98 bis et 98 ter, à l'aide duquel il a pu accuser des différences de température très-faibles dans les circuits métalliques et que nous avons mentionnées plus haut. Cet appareil consiste en une pince thermo-électrique FH ou AB, dont les branches sont terminées chacune par une soudure bismuth et antimoine ; cette pince s'applique sur le fil métallique IK soumis à 'expérience, de façon que les deux soudures pressent, à l'aide d'un ressort, deux points opposés d'une même section du fil ; les couples sont liés entre eux et communiquent à un galvanomètre très-sensible G. Afin d'éviter la communication métallique entre la pince et le fil, on met entre eux deux petits morceaux de papier de soie très-mince. Une crémaillière R permet de promener la pièce FH le long du fil ou des tiges métalliques soumises aux expériences.

Un autre galvanomètre N sert à indiquer l'intensité du courant fourni par une source électrique P, et qui passe dans le circuit IK dont on étudie les changements de température.

Cet appareil très-sensible a permis de constater que le plus faible courant électrique qui circule dans un fil suffit pour élever sa température. Il peut être considéré comme un thermoscope, et non comme un instrument mesureur, car il permet d'observer seulement les effets dus à l'excès de chaleur prise par la partie inférieure des pinces sur les pertes qui ont lieu par suite du refroidissement du fil.

Les résultats des observations de Peltier l'ont conduit aux conclusions suivantes :

1° Lorsque l'électricité, en parcourant un circuit, traverse la

surface de jonction de deux fils métalliques, l'élévation de température n'est pas la même suivant le sens du courant, toutes choses égales d'ailleurs, et l'intensité de ce dernier ne changeant pas; tandis que de chaque côté, dans les autres parties du circuit, les effets restent les mêmes dans les deux circonstances.

2° Si l'on fait usage d'antimoine ou de bismuth, et que, par exemple, ces deux métaux soient soudés bout à bout (fig. 98 ter), si la direction du courant est telle que l'électricité positive aille du bismuth à l'antimoine, on observe une élévation de température plus considérable que dans le reste du circuit, tandis que, si c'est l'inverse, la pince thermo-électrique indique un abaissement de température aux points de jonction.

Il faut, pour que cet abaissement de température se manifeste, que le courant électrique soit très-faible; si son intensité est trop considérable, il y a une élévation de température dans les deux cas; mais dans le second il est beaucoup plus faible, ce qui indique qu'il existe toujours une différence d'effet suivant le sens du courant.

Cet abaissement de température a été rendu également appréciable en plaçant la soudure dans un thermomètre à air. On a même, depuis cette époque, varié cette expérience remarquable et abaissé la température de la soudure de deux tiges de bismuth et d'antimoine jusqu'à zéro avant le passage du courant; alors, en plaçant une goutte d'eau dans une cavité pratiquée sur la soudure, et faisant passer un courant électrique dans une direction convenable, l'abaissement de température qui en résulte suffit pour faire descendre la température de l'eau au-dessous de zéro et la faire congeler.

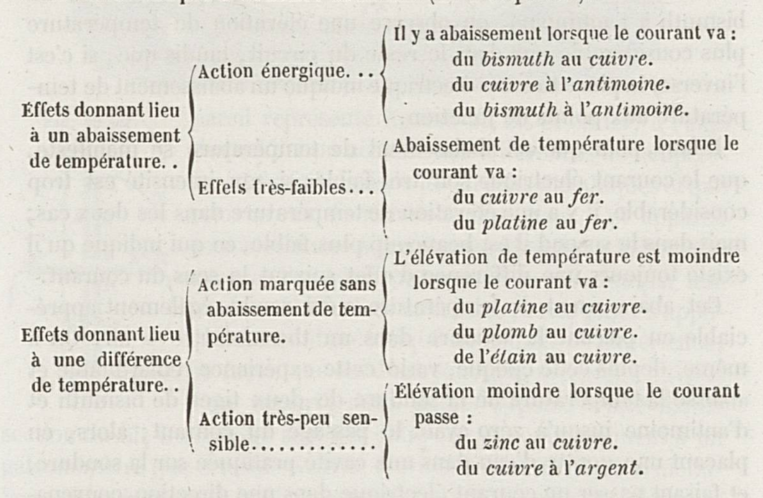
L'antimoine soudé au cuivre ou à un autre métal donne des effets analogues; avec des courants très-faibles en intensité, on a un abaissement de température quand le courant va du cuivre à l'antimoine; élévation lorsque c'est l'inverse.

Le bismuth soudé au cuivre donnant des effets inverses, on observe une élévation de température quand le courant va du cuivre au bismuth, abaissement lorsqu'il passe du bismuth au cuivre.

Le fer ordinaire en fil peut donner des abaissements de température au-dessous de la moyenne, pourvu que l'on fasse usage d'un courant électrique d'une très-faible intensité. On observe ces effets soit en soudant les fils de même diamètre ou de diamètre différent, soit en les réunissant après les avoir décapés, mais de façon qu'ils

se touchent sur une étendue plus grande que celle qui serait égale à la section du plus petit fil.

On peut, du reste, représenter les effets obtenus dans le tableau suivant, qui ne contient qu'un petit nombre des soudures que l'on peut former, mais suffisant pour montrer en quoi consiste le phénomène; il est nécessaire que l'on fasse seulement usage d'un courant très-faible, provenant soit d'un couple thermo-électrique, soit d'un faible couple à courant constant (E. Becquerel).



Effets donnant lieu à un abaissement de température. .	Action énergique. . .	Il y a abaissement lorsque le courant va : du *bismuth* au *cuivre*. du *cuivre* à l'*antimoine*. du *bismuth* à l'*antimoine*.
	Effets très-faibles. . .	Abaissement de température lorsque le courant va : du *cuivre* au *fer*. du *platine* au *fer*.
Effets donnant lieu à une différence de température. .	Action marquée sans abaissement de température.	L'élévation de température est moindre lorsque le courant va : du *platine* au *cuivre*. du *plomb* au *cuivre*. de l'*étain* au *cuivre*.
	Action très-peu sensible............	Élévation moindre lorsque le courant passe : du *zinc* au *cuivre*. du *cuivre* à l'*argent*.

On n'observe pas d'effets analogues dans des fils de même métal et de diamètre différent.

Si l'on examine quelles sont les relations qui existent entre ces résultats et les autres propriétés physiques des substances employées, on reconnaît que le pouvoir conducteur pour l'électricité n'y joue pas le principal rôle; car tantôt c'est l'abaissement, ou la moindre élévation de température qui a lieu en passant d'un meilleur conducteur dans un moins bon; *exemple :* cuivre-antimoine, cuivre-fer, etc.; tantôt c'est l'inverse; *exemple :* bismuth-cuivre, platine-cuivre, etc. Cependant, en dehors des effets indiqués dans la première division, tous les effets obtenus semblent montrer, pour les métaux autres que l'antimoine et le fer, que, lorsque le courant va d'un moins bon conducteur dans un meilleur, l'élévation de température est moindre.

Il est possible que ce phénomène soit lié d'une manière beaucoup plus générale aux résultats déjà connus. Si l'on cherche, en effet,

quel serait le sens du courant électrique développé par une faible élévation de température des soudures citées (indépendamment des inversions auxquelles donnent lieu des variations considérables de température), on voit que tous les métaux dont les noms sont au second rang dans le tableau cité plus haut prendraient l'électricité positive; c'est-à-dire que les couples développeraient dans un circuit un courant thermo-électrique dont la direction serait la même que celle qui produit un abaissement de température, ou, pour mieux dire, une élévation moindre de température à la soudure de jonction. Alors on pourrait formuler de la manière suivante les effets observés :

« Lorsqu'un courant électrique circulant dans un circuit métallique hétérogène composé de deux métaux arrive à la surface de séparation de ceux-ci, alors, l'élévation de température restant la même dans le reste du circuit, celle qui a lieu à la surface de jonction dépend du sens du courant, l'intensité électrique ne changeant pas. Si sa direction est la même que celle du courant thermo-électrique auquel on donnerait naissance en chauffant ces métaux, l'élévation de température à la surface de jonction est moins forte. Si cette direction est inverse de celle du courant électrique auquel donnerait lieu l'échauffement, l'élévation de température est plus considérable. Il y a même des métaux qui, dans le premier cas, donnent un abaissement de température au-dessous de la moyenne » (E. Becquerel).

Si l'on voulait se jeter dans le champ des hypothèses, en poussant plus loin cette conséquence, on remarquerait que, lorsqu'on forme un circuit composé de deux métaux, et que l'on échauffe une des soudures, il se produit un courant électrique qui agit comme courant pour abaisser la température de cette soudure; alors cet abaissement compense continuellement une partie de l'échauffement dû à la chaleur communiquée par la source calorifique, ce qui semble donner lieu à une véritable absorption ou perte de chaleur. Cela indiquerait une transformation de chaleur en électricité, et viendrait à l'appui des résultats sur lesquels nous aurons occasion de revenir plus loin. En tout cas, les effets calorifiques qui se manifestent aux surfaces de jonction des métaux indiquent un changement de résistance à la conductibilité, l'augmentation de température correspondant à une augmentation de résistance, et l'abaissement de température à un passage plus facile de l'électricité; ce sont donc deux ressauts opposés qui se mani-

festent suivant le sens d'après lequel l'électricité chemine (E. Becquerel).

Effets de chaleur produits lors du passage de l'électricité dans les liquides et dans les circuits mixtes. L'électricité, en traversant les liquides, donne toujours lieu à une élévation de température; mais les effets se compliquent des résistances qui se produisent lors du passage de cet agent des conducteurs métalliques dans les dissolutions, et par suite de la présence des gaz qui se dégagent aux pôles.

Le cas le plus simple qui puisse se présenter est celui où le liquide ne change pas de nature et où il n'y a aucun dégagement de gaz. Alors, en mesurant la quantité de chaleur dégagée par suite du passage du courant et d'après le procédé indiqué précédemment, à l'aide d'un calorimètre, on retrouve les lois simples données pour les métaux homogènes. Ainsi, supposons que l'on prenne pour liquide une solution de sulfate de cuivre, et pour électrodes deux lames de cuivre, ou bien une solution de nitrate d'argent et deux lames d'argent; on peut calculer la chaleur produite d'après la règle suivante :

« Lorsqu'un courant électrique traverse une dissolution saline, que l'électrode positive est d'un métal de même nature que celui dont l'oxyde forme la base du sel dissous, et qu'il ne se dégage aucun gaz aux électrodes, le seul résultat chimique de l'action du courant est un dépôt métallique au pôle négatif et une solution d'une même quantité de métal au pôle positif; dans ce cas, la quantité de chaleur dégagée par suite du passage de ce courant à travers ce liquide est soumise sensiblement aux mêmes lois que dans les fils métalliques, c'est-à-dire qu'elle est proportionnelle au carré du nombre qui représente l'intensité du courant, et proportionnelle à la résistance de ce liquide à la conductibilité; cette quantité de chaleur peut, en outre, être calculée de la même manière que dans les fils métalliques » (E. Becquerel).

Il résulte de là que, s'il y a dégagement de chaleur à un pôle par suite d'une combinaison chimique, ce dégagement compense exactement l'absorption de chaleur qui a lieu à l'autre pôle, et qui est nécessaire pour opérer une décomposition de la même matière.

Mais, s'il se dégage des gaz par suite du passage du courant, et si la résistance au passage est appréciable par rapport à celle du liquide, les phénomènes sont plus compliqués; l'élévation de température augmente bien toujours avec la quantité d'électricité qui

passe ; mais, comme la résistance du circuit est variable avec cette intensité, il est difficile de formuler la loi suivant laquelle la température augmente. Pour montrer combien le phénomène est complèxe dans ce cas, nous citerons une observation de M. Oersted sur l'élévation de température d'une colonne liquide soumise à l'action d'un courant électrique. Il a trouvé que le thermomètre placé près du pôle positif marquait 20°,5, celui du pôle négatif 18°, et un troisième, placé entre les deux, 23°. Ainsi la température au pôle positif était plus élevée qu'au pôle négatif, et au milieu du liquide elle était encore plus grande. On peut attribuer cette différence à ce que les substances gazeuses, quand elles se dégagent, n'absorbent pas la même quantité de chaleur en reprenant l'état gazeux. En outre, la résistance à la conductibilité entrant comme élément dans l'expression de la mesure de la quantité de chaleur dégagée, aux deux pôles les effets se compliquent de ce nouvel élément.

En prenant pour calorimètre un creuset en platine rempli d'eau conductrice, évaluant la quantité de chaleur dégagée par suite du passage du courant au travers de la masse liquide à l'aide de deux lames en platine plongées au milieu, le dégagement de gaz mélangeant ensemble, à chaque instant, toutes les parties du liquide, on trouve les résultats suivants (E. Becquerel) :

« Dans la décomposition électro-chimique de l'eau, si l'on ajoute à la chaleur dégagée dans le liquide par le passage du courant, celle qui serait produite par la recomposition de l'eau formée à l'aide des gaz dégagés aux deux pôles, on a des nombres qui sont sensiblement proportionnels à la résistance à la conductibilité, et en raison directe du carré de la quantité d'électricité qui passe dans un temps donné. »

On vérifie également cette loi en employant, pour rendre l'eau plus conductrice, un sel soluble, tel que du sulfate de soude, dont les éléments, l'acide sulfurique et la soude, sont solubles et se recombinent continuellement dans le creuset à mesure que la décomposition a lieu ; l'eau est ainsi décomposée comme si elle était seule, et ce qui le prouve, c'est que, lorsque deux voltamètres sont placés dans le même courant, et que l'un contient de l'eau acidulée, l'autre de l'eau tenant en dissolution du sulfate de soude, ils donnent la même quantité de gaz oxygène et de gaz hydrogène.

Lorsque les électrodes sont formées de métaux oxydables, les effets se compliquent encore de l'oxydation des éléments métalliques. Du reste, il résulte des faits observés que la chaleur dégagée

par un courant électrique quelconque et dans un circuit également quelconque est proportionnelle au produit du carré de l'intensité du courant par la résistance à la conductibilité qu'il éprouve et mesure comme il a été dit page 78 et suivantes.

Chaleur développée dans les couples voltaïques. Considérations théoriques. Depuis Davy on a cherché à différentes reprises à prouver que la chaleur produite dans les actions chimiques, sans électricité transmise au dehors, était due à l'électricité dégagée. M. Joule a dirigé particulièrement ses recherches dans cette voie, mais il n'a pu prouver ce fait directement, quoiqu'il soit arrivé à cette conclusion, que les quantités de chaleur dégagée par la combustion des équivalents des corps sont proportionelles à leurs affinités pour l'oxygène.

Un moyen se présentait aux observateurs ; c'était de faire usage d'un ou de plusieurs couples voltaïques et de comparer la quantité de chaleur produite dans les couples par l'action chimique qui engendre le courant, et en dehors des couples dans les fils servant à établir la communication électrique. M. Delarive, qui a fait quelques recherches dans cette direction, est arrivé aux conclusions suivantes :

« Quand on se sert d'un seul couple dont le courant continu traverse des fils métalliques plus ou moins fins, la somme des quantités de chaleur développées dans le fil et dans le liquide du couple est constante pour une même quantité d'électricité : seulement, suivant la grosseur du fil, c'est tantôt l'une, tantôt l'autre de ces deux quantités qui est la plus considérable ; et ce qui semble toujours déterminer le degré de réchauffement des différentes parties d'un circuit voltaïque, c'est la résistance qu'elles présentent. »

M. Favre a traité le même sujet et a déterminé de plus directement la quantité de chaleur produite dans les actions chimiques des couples, afin de voir si cette quantité était moindre ou plus grande lorsqu'on fermait le circuit des couples pour laisser circuler l'électricité en dehors. Les expériences ont été faites en plaçant le petit couple servant à fournir l'électricité, ainsi que le fil résistant développant de la chaleur, chacun dans un calorimètre à mercure d'une forme particulière, et semblable à celui qui lui avait servi pour les recherches sur la chaleur dégagée dans les actions chimiques, faites conjointement avec M. Silberman. Ces calorimètres à mercure, de la forme d'un gros thermomètre avec une cavité pour recevoir les corps développant de la chaleur, donnaient par la marche d'une

colonne mercurielle la quantité de chaleur versée dans l'appareil. De cette manière il pouvait déterminer séparément et la quantité de chaleur produite dans le couple, et celle qui était accusée dans le fil servant à établir la communication électrique entre les deux pôles. Ses expériences l'ont conduit aux conclusions suivantes :

1° Le dégagement de chaleur produit par le passage de l'électricité voltaïque au travers des conducteurs métalliques est complémentaire de la chaleur confinée dans les éléments de la pile, pour former une somme égale à la chaleur totale correspondant aux réactions chimiques indépendamment de toute électricité transmise.

2° Les décompositions chimiques que peut réaliser le passage de l'électricité au travers du circuit mettent toujours en jeu les mêmes quantités de chaleur qui accompagnent les segrégations chimiques opérées sous d'autres influences.

La chaleur mise en jeu dans l'acte de ces décompositions résulte toujours d'un emprunt fait à la chaleur totale dégagée par les actions chimiques de l'appareil voltaïque.

La première conclusion est semblable à celle qui résulte des recherches de M. Delarive.

Il est important que de nouvelles recherches soient faites dans cette direction, surtout en présence des travaux de MM. Joule, Mayer, Clausius, Thomson, Regnault, d'après lesquels il faut faire entrer un nouvel élément dans la discussion des actions dynamiques de la chaleur. En effet, il faudrait concevoir que pendant le développement d'actions dynamiques produites à la suite de phénomènes calorifiques, il y a une certaine quantité de chaleur qui devient latente tant que l'action dynamique s'exerce, et redevient sensible quand le travail moteur n'a plus lieu ; en d'autres termes, la chaleur est considérée comme une force vive qui peut produire du mouvement, des élévations de température, etc., mais qui n'est capable que d'une certaine somme d'action que l'on peut appliquer à tel ou tel travail. Nous avons déjà fait mention de cette hypothèse à propos du dégagement de l'électricité, page 250.

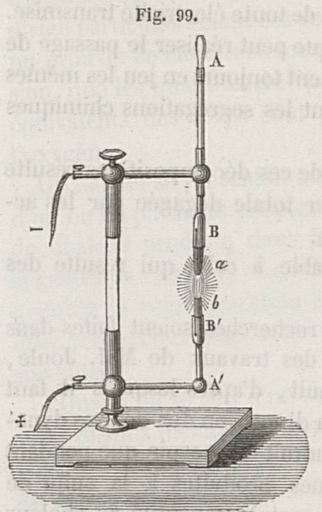
Les recherches tentées dans cette voie méritent donc un examen sérieux.

Effets calorifiques produits dans l'arc voltaïque. Quand on emploie pour conduire le courant électrique provenant d'une pile puissante du charbon de cornue, médiocre conducteur, on observe au moment du contact des phénomènes lumineux d'un éclat extraordinaire et des phénomènes calorifiques supérieurs à tous ceux

que l'on peut produire par tous les autres moyens physiques. Davy est le premier qui ait fait cette expérience remarquable que l'on répète facilement aujourd'hui avec 40 à 50 éléments à acide nitrique (avec de petits éléments de la forme de ceux représentés figure 78, page 231, il en faut au moins un nombre variant de 60 à 100; avec de grands éléments semblables à ceux de la figure 78 bis ou 79, on peut se borner à en employer de 40 à 50).

On peut observer le phénomène dans l'air ou dans le vide. Les appareils destinés à la production sont représentés figure 99 et 99 bis.

Fig. 99.

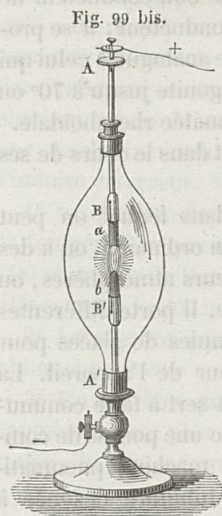


Dans le premier appareil, les tiges de cuivre AB, A'B', mises en communication avec les pôles de la pile, contiennent des baguettes de charbon de cornue conducteur *a* et *b* entrant à frottement dans des tubes de cuivre B et B'. La tige supérieure peut se mouvoir à frottement pour amener le contact entre les charbons, et pour pouvoir les séparer immédiatement après.

Quand les deux tiges communiquent avec les pôles de la pile, si les charbons sont à une certaine distance l'un de l'autre, le circuit n'est pas fermé et l'électricité ne passe pas; mais, une fois le contact établi entre les deux cônes de charbon, il se manifeste aux points où ils se touchent une incandescence excessivement vive, et l'on peut éloigner les deux pointes de charbon graduellement l'une de l'autre jusqu'à plusieurs centimètres, suivant le nombre des éléments de la pile. Le courant continue à passer, et un globe de flamme auquel on a donné le nom d'*arc voltaïque* apparaît entre les cônes, lequel ne reste pas fixe et est continuellement agité ; on doit le considérer comme une succession non interrompue d'étincelles, ou, si l'on veut, comme un courant électrique transmettant dans l'intervalle des deux cônes de charbon des parcelles de charbon incandescentes. Ce qui montre bien que cet arc est dû à un courant électrique établi à l'aide de particules incandescentes, c'est qu'il obéit à l'action d'un aimant, de même que les fils métalliques parcourus par l'électricité, comme on le verra dans le troisième volume.

Quand l'expérience dure depuis quelques instants, en même temps que le phénomène se produit, il y a combustion du charbon, et, les cônes se brûlant, la distance *ab* augmente et l'arc est bientôt rompu, à moins que l'on ne rapproche les tiges métalliques. Dans le vide il n'en est pas ainsi. L'appareil destiné à produire alors l'arc voltaïque est un œuf électrique dans les douilles duquel passent les tiges AB, A'B'. La tige A'B' est fixe, mais AB glisse à frottement à la partie supérieure de l'appareil. Quand le courant circule entre les cônes de charbon *a* et *b*, on observe le même phénomène que dans l'air, mais l'arc est plus long, et il n'y a pas combustion du charbon. On remarque seulement que le cône de charbon communiquant avec le pôle positif se creuse, tandis que celui qui communique avec le pôle négatif augmente à son extrémité. Cet effet indique d'une manière bien nette le phénomène de transport des particules incandescentes de charbon du pôle + au pôle —; on observe donc encore dans ce cas un effet mécanique analogue à ceux dont nous avons parlé précédemment quand l'électricité circule avec moins d'intensité dans les liquides. Cet arc voltaïque sera étudié comme lumière électrique ci-après, et nous n'en parlerons ici que pour citer les phénomènes calorifiques qu'il peut produire.

Fig. 99 bis.



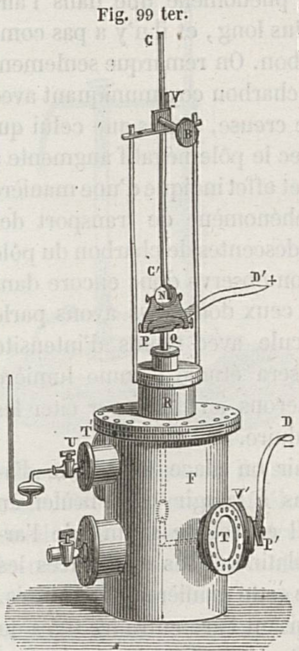
Si au milieu de l'arc obtenu dans l'air on place une lame d'acier, une tige de fer, elle ne tarde pas à rougir et à brûler en lançant de toutes parts des étincelles. Il en est de même de l'argent, du zinc et d'autres métaux. Le platine et les substances les plus réfractaires peuvent être fondus de cette manière et volatilisés. On peut obtenir le même effet en produisant l'arc entre les tiges de ces métaux, ou bien en le formant entre un cône de charbon et une tige métallique. On emploie habituellement un morceau de charbon creusé en forme de coupe communiquant au pôle positif, à la partie inférieure de l'appareil (fig. 99), et un cône de charbon négatif; on met un fragment du métal à essayer dans la coupe, et on descend ce cône jusqu'à ce que l'on touche le morceau de métal; il fond, entre en incandescence, et ses particules brûlent tout en étant transportées de la coupe au pôle négatif supérieur.

On a pu obtenir ainsi les plus grands effets de chaleur. M. Jacquelain, en plaçant un diamant au milieu de l'arc voltaïque, a vu ce corps s'échauffer, arriver au rouge, se ramollir, puis passer à l'état de coke, et se comporter ensuite comme bon conducteur de l'électricité. On sait que le diamant n'est pas conducteur; il se produit donc, dans ce cas, un effet de dimorphisme analogue à celui qui se manifeste quand on chauffe un cristal d'arragonite jusqu'à 70° ou 80°. Ce dernier se change alors en chaux carbonatée rhomboïdale.

M. Despretz a fait usage de l'appareil suivant dans le cours de ses recherches sur les effets de l'arc voltaïque :

F est un vase en fonte à six tubulures, dans lequel on peut opérer à la pression ordinaire, ou à des pressions de plusieurs atmosphères, ou même dans le vide. Il porte différentes tubulures T, T' munies de glaces pour voir dans l'intérieur de l'appareil. La tubulure à robinet sert à faire communiquer le vase avec une pompe de compression ou une machine pneumatique. U est une tubulure destinée à faire communiquer le vase en fonte avec un manomètre. V' et R sont les tubulures dans lesquelles passent les tiges devant être mises en communication avec un des pôles de la pile. R se trouve à la partie supérieure, et porte une boîte à cuir; une tige Q à laquelle est attaché le charbon supérieur peut glisser dans l'intérieur d'une boîte à cuir; elle est surmontée d'une crémaillère divisée CC' que l'on fait mouvoir à l'aide du bouton B. Un vernier V fait connaître la distance que parcourt la cremaillère, et par suite la distance des deux charbons. La boule N en verre sert d'isolant à la crémaillère. P, P' sont des pinces destinées à serrer les rubans de cuivre D et D' en relation avec les extrémités de la pile.

Fig. 99 ter.



En outre de cela, M. Despretz a réuni ensemble les trois sources les plus puissantes de chaleur, l'action solaire au foyer d'une lentille, la combustion des gaz oxygène et hydrogène, et l'arc vol-

taïque, afin d'augmenter considérablement les effets produits par ce dernier seul. Il a eu par conséquent à sa disposition la plus haute source calorifique qui ait jamais été formée; aussi croyons-nous devoir rapporter avec détails les résultats des expériences qu'il a été à même de faire avec ce moyen énergique d'action. On aura une idée de la puissance des appareils, quand on songe que l'arc voltaïque était obtenu avec 600 éléments à acide nitrique. Le charbon qui a servi aux observations était du charbon de sucre très-pur, le charbon ordinaire renfermant des silicates fusibles aurait pu l'induire en erreur. Voici les résultats qu'il a obtenus :

1° Le charbon dans le vide se réduit manifestement en vapeur à la température que cette substance acquiert avec une pile de 500 à 600 éléments de Bunsen, réunis en cinq ou six séries. Dans un gaz elle est plus lente, mais elle s'accomplit également.

2° Le charbon porté à la température la plus élevée qu'on ait obtenue peut être courbé, soudé et fondu.

3° Un charbon quelconque devient d'autant moins dur qu'il est soumis pendant plus longtemps à une température élevée. En définitive, il se transforme en graphite.

4° Le graphite le plus dur se dissipe peu à peu par la chaleur, comme le charbon. La partie non volatilisée est toujours du graphite.

5° Le diamant se change, par la chaleur d'une pile suffisamment forte, en graphite, comme toute espèce de charbon. Il donne, comme le charbon, naissance à de petits globules fondus, quand il est chauffé assez longtemps.

6° Si l'on rapproche les résultats de ces expériences de la production du graphite dans les hauts fourneaux, de la forme hexaèdre du graphite naturel, forme incompatible avec l'octaèdre régulier, il semble qu'on est conduit à penser que le diamant n'est pas le produit d'une chaleur intense sur les matières organiques ou charbonnées.

7° On a pu fondre en quelques minutes 250 grammes de platine; on en aurait fondu une plus grande quantité. Si l'on opère sur quelques grammes, on peut en volatiliser une partie notable. Le procédé pourrait être utilisé dans l'industrie de ce métal.

On a fondu également 80 grammes de palladium.

8° Le silicium s'est fondu avec facilité; il s'est immédiatement rassemblé en un globule qui raye le verre.

Le bore fond à la première application de la chaleur en globules

légèrement vitreux à la surface. Il a peu de dureté, et est plus fusible et plus volatil que le silicium.

Ces expériences ont été faites dans l'azote, pour éviter l'oxydation.

9° Le titane fond et se volatilise facilement. Fondu, il est d'un jaune d'or un peu pâle. Il est moins dur que le tungstène, mais raye le quartz, le zircon, et est presque aussi dur que le corindon.

Le tungstène se fond facilement dans un creuset de charbon de sucre, comme le titane, le bore et le silicium. Il est très-dur, et même raye le rubis.

Nous devons encore mentionner les effets différents que l'on observe aux pôles entre lesquels on produit l'arc voltaïque. L'élévation énorme de température qui accompagne sa production se manifeste aussi dans les électrodes, dont la positive surtout s'échauffe beaucoup plus fortement que la négative (Matteucci, Delarive, etc.). Cependant, quand on opère avec un appareil d'induction, le même dont il sera question dans l'électro-magnétisme et qui nous servira à indiquer quelques effets remarquables de lumière électrique, si on rapproche l'un de l'autre deux fils de platine ou de fer en communication avec les deux extrémités du fil d'induction de façon à établir dans l'air un arc entre les pointes très-rapprochées, on voit le fil négatif rougir et fondre, tandis que le fil positif reste froid. Ce fait est en désaccord avec celui que M. Neef a observé et qui sera rapporté plus loin à propos de la lumière de l'arc voltaïque; il est également en opposition avec celui qu'on observe en faisant usage d'une pile voltaïque très-intense. Il peut se faire que les effets divers que l'on obtient proviennent de la nature des conducteurs; lorsque l'arc voltaïque est formé, on doit considérer le circuit comme fermé, et alors les effets de température peuvent être différents dans les diverses parties suivant leur résistance; cela résulte, comme on va le voir, des expériences de M. Delarive sur l'influence de la nature et de la forme des électrodes sur l'arc voltaïque.

Lorsqu'on opère avec une pile ordinaire et qu'on produit l'arc voltaïque, cet effet ne peut avoir lieu qu'autant que cette pile est à haute tension, ce qui prouve la résistance considérable que présente au passage du courant électrique la matière très-divisée qui établit la communication entre les deux pôles. Cet arc ne peut s'établir, avons-nous dit, qu'autant qu'il y a eu préalablement contact entre les deux électrodes, ou bien que l'un des deux soit terminé en pointe et que la pile formée d'un très-grand nombre d'éléments soit isolée (Gassiot, Despretz, etc.). Cependant, sans qu'il y ait contact,

on peut établir l'arc entre deux électrodes très-rapprochées en faisant passer entre elles la décharge d'un bouteille de Leyde. Cela tient à ce que cette décharge est toujours accompagnée d'un transport de matière très-divisée qui ferme le circuit pendant le temps nécessaire pour l'établissement de l'arc (Daniel, Van Breda, etc...).

La longueur de l'arc que l'on peut obtenir et les divers effets produits dépendent de plusieurs conditions que nous allons indiquer en citant quelques-unes des recherches faites sur l'arc voltaïque. M. Delarive a observé que lorsqu'on produit l'arc voltaïque entre une pointe et une plaque de même nature, soit dans l'air, soit dans le vide, la distance limite au delà de laquelle l'arc lumineux cesse d'être produit est en général pour la même plaque et la même pointe, et quand c'est la plaque qui communique avec le pôle positif, double de ce qu'elle est lorsque la pointe communique avec ce même pôle. Cependant la différence est d'autant moins considérable que la pile est plus forte. Quant à la valeur absolue de cette distance, elle est très-variable; elle dépend de la puissance de la pile, de la nature et de l'état moléculaire des électrodes, du temps pendant lequel le phénomène a duré. Avec les métaux facilement fusibles ou oxydables, tels que le zinc et le fer, elle est bien plus considérable qu'avec le platine et l'argent. La durée du phénomène influe en ce que la haute élévation de température qu'acquièrent les électrodes permet de les éloigner davantage sans rompre l'arc. On peut produire le même effet en les chauffant artificiellement avec une lampe à alcool.

Il est évident, d'après ce qui précède, que la longueur de l'arc lumineux dépend de la facilité que possèdent les électrodes, suivant leur nature, à être désagrégées, facilité qui est peut-être dépendante de leur température, laquelle diminue leur cohésion, de leur tendance à s'oxyder, qui produit le même effet, de leur état moléculaire, et enfin de leur nature même. Le charbon doit à sa constitution moléculaire, qui le rend si friable, la propriété d'être l'une des substances qui donnent naissance à l'arc lumineux le plus long.

Les dépôts de matière transportée forment sur la plaque, quand elle est négative et sur la pointe positive, une espèce d'anneau très-régulier, dont la projection de la pointe sur la plaque est le centre. Dans l'air et avec des électrodes métalliques, ces dépôts sont tous de la poussière d'oxyde du métal dont est faite l'électrode positive.

Avec des électrodes en platine et dans l'air très-raréfié, il se

forme sur la plaque de platine, quand elle sert d'électrode positive, une tache bleuâtre parfaitement circulaire et présentant l'aspect d'un anneau coloré; la même tache se forme dans l'air atmosphérique, mais son diamètre est moitié moindre et ses couleurs beaucoup moins vives. Dans l'hydrogène, il ne se produit point de tache colorée. Sa formation peut donc être le résultat d'une oxydation qu'éprouve le platine à une haute température, quand il sert d'électrode positive dans l'air ordinaire, et encore mieux peut-être dans l'air raréfié. Quand la même lame de platine sert d'électrode négative, la pointe étant positive, elle se recouvre d'une tache blanche également circulaire, formée par une foule de petits grains de platine qui, ayant été portés à une haute température, sont demeurés adhérents à sa surface. La tache blanche est, comme la bleue, beaucoup plus large dans l'air raréfié que dans le vide.

Si l'on remplace la pointe de platine par une pointe de coke, la plaque restant de platine, et étant positive, on obtient un arc lumineux d'une longueur plus que double de celle de l'arc qui avait lieu avec une pointe de platine. Quant à l'arc lui-même, au lieu d'être un cône de lumière ayant sa base sur la plaque et son sommet à la pointe, comme cela se passait quand celle-ci était de platine, il présente une foule de jets lumineux partant de diverses parties de la plaque pour aboutir à différents points du conducteur en coke. Ce fait montre évidemment l'influence que peut exercer l'électrode négative, dont le rôle est bien loin d'être purement passif. On doit ajouter que, bien que la force de la pile fût exactement la même que lorsque la pointe était de platine, non-seulement l'arc lumineux était beaucoup plus long avec la pointe de coke, mais encore la chaleur développée sur la plaque de platine était tellement plus considérable, que celle-ci fut promptement fondue et trouée. Le coke étant positif et la lame négative, la longueur de l'arc lumineux fut moindre que dans le cas précédent, surtout dans l'air, où elle fut sensiblement plus petite que dans le vide.

Avec des métaux différents, on observe des effets dépendant de leur nature et des substances transportées. Avec le mercure, dans le vide comme dans l'air, l'effet lumineux est des plus brillants. Le mercure est dans un état d'agitation extrême, se soulevant en forme de cône quand il est positif, et présentant une cavité bien prononcée au-dessous de la pointe positive quand il est négatif.

M. Delarive a montré l'influence qu'exerce la nature des pointes

métalliques sur la température qu'elles acquièrent dans le phénomène de l'arc voltaïque. Si les deux pointes sont de même métal, de platine ou d'argent, la positive seule devient incandescente dans toute son étendue. Si la positive est d'argent et celle de platine négative, c'est celle-ci qui devient incandescente, et celle d'argent s'échauffe beaucoup moins. Ainsi donc, quand l'arc voltaïque est établi, il faut considérer le circuit comme fermé, et alors ce sont les parties du circuit qui présentent le plus de résistance au courant qui s'échauffent le plus : d'abord la portion qui forme l'arc même, ensuite, dans le reste du circuit, le métal le moins conducteur. Mais si de part et d'autre de l'arc les conducteurs sont identiques, ou s'il n'y a entre eux que de légères différences de conductibilité, alors le réchauffement, au lieu d'être uniforme, comme il semblerait devoir l'être, est beaucoup plus considérable pour le côté positif, ainsi qu'on l'a dit plus haut. Ce fait important indique évidemment que cette portion du circuit offre une résistance beaucoup plus énergique que celle qui a lieu de l'autre côté, ce que confirme la désagrégation moléculaire accompagnant cette action à l'électrode positive.

M. Despretz, qui s'est occupé de l'influence de la position des électrodes dans la production de l'arc voltaïque, a été conduit aux conclusions suivantes :

1° La direction des charbons étant supposée verticale, on remarque que la longueur de l'arc croît plus que proportionnellement au nombre des éléments, pour une pile disposée bout à bout.

L'accroissement est plus rapide pour des petits arcs que pour des grands arcs. Ainsi, l'arc produit par 100 éléments est presque quadruple de celui que donnent 50 éléments; celui de 200 n'est pas trois fois celui de 100; celui de 600 est entre sept et huit fois l'arc de 100.

Le pôle positif est ici supposé en haut; dans ce cas, l'on a obtenu des arcs qui atteignaient 2 décimètres pour la pile de 600 éléments disposés bout à bout.

2° Si l'on dispose la pile de manière à réunir les pôles de même nom, ou, comme on dit, en quantité, la longueur de l'arc croît moins que proportionnellement au nombre des couples. Ainsi, l'arc de 100 éléments étant de $25^{mm},2$, il n'est que de $69^{mm},2$ pour 600 éléments disposés en six séries parallèles de 100, tandis que les 600 éléments placés bout à bout, c'est-à-dire en tension, donnent un arc de $183^{mm},5$.

3° Lorsque le pôle positif est en bas, l'arc a moins de longueur. Une pile de 600 éléments réunis en six séries parallèles de 100, donne un arc de 74 millimètres si le pôle positif est en haut, et seulement de 56 millimètres si ce pôle est en bas.

4° Si la ligne des charbons est horizontale, l'arc est nécessairement rompu plus vite. Ici, la pile disposée en quantité prend l'avantage: par exemple, six séries de 100 éléments, disposées parallèlement, donnent un arc de $40^{mm},5$; bout à bout, elles donnent seulement un arc de $27^{mm},6$.

Dans cette position des charbons, on a véritablement l'arc voltaïque. La lumière passe d'abord directement en ligne droite, puis il se forme un vide obscur au-dessous et au-dessus de la ligne des charbons, et la lumière est terminée à la partie inférieure par un arc circulaire. A mesure qu'on écarte les charbons, cette espèce de voûte s'élève, prend bientôt la forme d'un angle aigu; alors l'arc se rompt, ou il est sur le point de se rompre pendant la durée de l'expérience, la flamme s'élève à un certain nombre de centimètres au-dessous de la voûte, selon l'énergie de la pile, sous la forme d'un cône ayant son sommet en haut.

5° Dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique, l'arc est plus grand lorsque le pôle positif est à l'est que lorsqu'il est à l'ouest. Pour 100 éléments, les nombres sont $14^{mm},4$ et $11^{mm},35$; pour 200, disposés en deux séries de 100, ces nombres deviennent $20^{mm},8$ et $16^{mm},5$. Ainsi l'influence du magnétisme terrestre augmente ou diminue l'énergie du courant de la pile, suivant le sens de la direction de celui-ci.

Nous avons parlé de l'arc électrique dans l'air et dans les gaz raréfiés; on peut l'obtenir également dans les liquides, l'eau, l'alcool, etc., mais il est beaucoup moins long; il se produit alors, avec des circonstances toutes particulières, car, si l'on fait abstraction des effets chimiques qui peuvent avoir lieu entre la matière des électrodes et le liquide, il semble que le transport de matière soit diminué s'il n'est pas détruit tout à fait, ainsi qu'on le verra dans le chapitre suivant. Dans quelques cas, ce résultat pourrait être utilisé dans les appareils où l'on cherche à rendre fixe la lumière de l'arc voltaïque, si l'arc n'était pas autant diminué de longueur. Ces appareils, étant fondés sur l'emploi des électro-aimants, ne pourront être décrits que dans le troisième volume de cet ouvrage.

CHAPITRE IV.

Effets lumineux.

Lorsque des conducteurs d'une machine électrique livrent passage à l'électricité, et que celle-ci est en quantité suffisante, il se manifeste une lueur tout autour d'eux ; on aperçoit même çà et là des traînées lumineuses qui s'ouvrent en éventail, et sont accompagnées d'un bruit particulier : ces traînées lumineuses portent le nom d'aigrettes électriques. Quand la tension de l'électricité est suffisante, et que l'on approche du conducteur un autre conducteur, il se produit entre les deux une étincelle électrique dont la longueur et l'intensité dépendent de la quantité d'électricité mise en jeu. Enfin, si la quantité d'électricité qui passe se renouvelle continuellement alors même que la tension n'est pas très-grande, il en résulte un arc comme celui que l'on obtient à l'aide d'une pile voltaïque. Dans ces différentes circonstances on observe les phénomènes lumineux de l'électricité, c'est-à-dire les différentes formes de l'étincelle électrique. L'étincelle est produite, sans aucun doute, par l'incandescence des particules matérielles solides, liquides ou gazeuses, résultant du passage de l'électricité, particules provenant des milieux dans lesquels elles éclatent et des conducteurs d'où elles sont arrachées. Il est nécessaire, pour en avoir la preuve, de montrer comment la nature et l'état du milieu et des conducteurs et la tension électrique modifient ces différents effets.

Lueurs électriques et phosphorescentes. Les lueurs électriques s'observent dans beaucoup de circonstances; lorsque l'électricité a une tension suffisante pour s'échapper des conducteurs, et qu'elle est émise dans toutes les directions en donnant lieu à une multitude de petites décharges au travers de l'air, il en résulte une auréole lumineuse qui enveloppe le conducteur, et qui peut être rapportée aux lueurs électriques. Nous verrons dans le livre suivant que,

lorsque l'atmosphère est fortement électrique ou qu'il existe des nuages orageux, on peut apercevoir, la nuit, à l'extrémité des tiges de paratonnerre, sur les objets en fer que l'on tient à la main, à l'extrémité des lances ou des fusils des soldats, des lueurs qui ont la même origine. Les apparences lumineuses connues sous le nom de Castor et Pollux et de feu Saint-Elme, qui se montrent à l'extrémité des mâts, sont dues à la même cause.

En soumettant les molécules des corps à des actions mécaniniques, chimiques ou spontanées, ou à l'influence de la chaleur, il en résulte quelquefois des effets lumineux ou de phosphorescence qui peuvent être rapportés à l'électricité, attendu, d'une part, que la phosphorescence, de même que le dégagement de l'électricité, a lieu dans tous les cas où l'équilibre des forces électriques est troublé, et, de l'autre, que la lumière électrique se présente à nous avec les différentes teintes que l'on retrouve dans la lumière phosphorique (Becquerel).

Lorsqu'on clive, par exemple, une lame de mica dans l'obscurité, on aperçoit une faible lueur bleuâtre, et les parties séparées manifestent chacune une électricité contraire. La phosphorescence, dans ce cas, a bien une origine électrique.

L'acide borique, fondu dans un creuset de platine, se fendille au moment du refroidissement, en répandant une vive lumière qui suit la direction des fentes. Cet effet lumineux paraît être dû à la même cause que le précédent.

De même, quand on broie dans un mortier certaines variétés de feldspath, ou bien que l'on frappe à coups redoublés sur le feldspath adulaire, qui se clive avec facilité, la lumière phosphorique produite dans le sens des fissures a évidemment une origine électrique. Il en est de même du chlorate de potasse broyé fortement dans un mortier; cette substance petille, devient lumineuse et jette des étincelles.

Cette propriété d'émettre de la lumière n'est pas partagée par les corps bons conducteurs de l'électricité.

Le frottement produit des effets semblables, c'est-à-dire de l'électricité et une lueur phosphorique. Nous citerons la dolomie, le spath-fluor, dont la surface est grenue, la chaux phosphatée de l'Estramadure, etc., etc.

Dans le clivage des substances minérales cristallisées non conductrices de l'électricité, la phosphorescence paraît due à la recomposition des deux électricités mises en liberté à l'instant où l'attraction moléculaire est détruite. Des effets analogues doivent avoir

lieu à l'instant où cette même action s'exerce, c'est-à-dire pendant la cristallisation; en effet, le fluorure de sodium donne, par une évaporation lente, des cristaux cubiques réguliers qui se déposent au fond du vase. Si la cristallisation s'opère dans l'obscurité, il y a scintillation, effet de phosphorescence.

Les cristaux d'acide arsenieux, pendant qu'ils se forment, donnent lieu à une émission de lumière assez forte. Il faut pour cela dissoudre 2 à 3 grammes d'acide arsenieux vitreux dans 45 grammes d'acide chlorhydrique non fumant étendu de 15 grammes d'eau, faire bouillir le tout pendant un quart d'heure, et laisser refroidir le mélange aussi lentement que possible, en diminuant graduellement la flamme de la lampe d'alcool. On voit dans l'obscurité que la cristallisation est accompagnée d'une forte émission de lumière : chaque cristal donne lieu à une étincelle (H. Rose).

D'autres sels produisent les mêmes phénomènes; nous citerons des mélanges fondus de 11 parties de sulfate de potasse et de 9 de sulfate de soude; de 2 parties de sulfate de potasse et de 1 de chlorure de sodium; de 8 de sulfate de potasse et de 3 de carbonate de soude; des poids atomiques égaux de sulfate de soude et de chromate ou de séléniate de potasse, etc. Quand on dissout ces mélanges dans l'eau bouillante jusqu'à saturation, ils donnent toujours de la lumière en cristallisant.

Le chlorure de calcium produit des effets non moins remarquables lorsqu'il est complétement fondu dans son eau de cristallisation, et qu'on le laisse refroidir graduellement dans une chambre obscure; non-seulement la lumière phosphorique persiste pendant plusieurs minutes, mais l'on voit encore distinctement de larges étincelles et des coruscations accompagnées d'un craquement dû probablement à la contraction soudaine de la masse ou à la cristallisation. Plusieurs substances fondues présentent des effets analogues.

La chaleur, qui est une cause puissante de phosphorescence produisant un véritable clivage moléculaire, doit donner une lueur électrique plus soutenue. Nous nous abstenons de rapporter ici les noms des substances qui deviennent ainsi phosphorescentes tant elles sont nombreuses (Becquerel).

Dans le règne organique nous trouvons des effets du même genre. M. Ehrenberg, qui a étudié avec soin la lumière émise par les infusoires et les annélides, lesquels rendent certaines eaux lumineuses, ayant placé sur le porte-objet de son microscope de l'eau renfermant de ces animalcules, a reconnu que la lueur diffuse qui les

entourait n'était autre que la réunion d'une multitude de petites étincelles qui partaient de tous les points de leurs corps, particulièrement chez les annélides. Ces étincelles se succédaient avec une telle rapidité, elles avaient une telle ressemblance avec celles que l'on observe dans la décharge électrique, que M. Ehrenberg n'a pas hésité à établir leur identité.

Diverses fleurs, telles que la capucine et le souci, montrent, dit-on, des phénomènes lumineux par scintillation pendant les nuits des plus beaux jours de l'été. Ce genre de phosphorescence, analogue à la phosphorescence spontanée des animaux, mériterait d'être bien constaté.

Aigrettes. On donne ce nom à des rayons électriques plus ou moins longs qui se présentent sous des formes diverses, lorsque la tension électrique est suffisante et que la décharge se fait de proche en proche au moyen des particules du milieu qui environnent les conducteurs.

On peut les obtenir en fixant à angle droit sur le conducteur positif d'une machine électrique, une tige métallique de quelques millimètres de diamètre et arrondie par le bout extérieur. La main ou toute autre surface conductrice peut être approchée vers l'extrémité pour augmenter la force conductrice.

L'aigrette obtenue avec une puissante machine et une boule de cuivre de 18 millimètres de diamètre, fixée à l'une des extrémités d'une longue tige de cuivre et terminée par un petit appendice cylindrique, a l'apparence indiquée figure 100.

Fig. 100.



On voit une petite partie conique brillante au milieu de la sphère; elle se brise soudainement en une large aigrette d'un grand nombre de ramifications dont la lueur est pâle, ayant un mouvement tremblé, et accompagné en même temps d'un claquement sourd et faible. L'aigrette paraît continue, et cependant elle n'est pas le résultat d'une décharge instantanée; elle résulte d'une succession de petites décharges entre les molécules d'air se succédant rapidement, et ce n'est que par une illusion d'optique que sa forme est apparente, car elles se succèdent avec assez de rapidité pour faire naître la sensation de continuité.

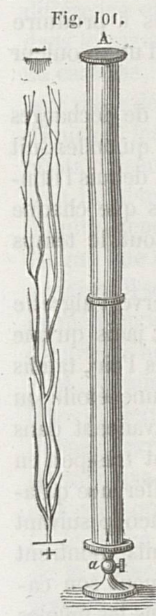
En faisant usage d'une sphère plus petite, l'aigrette est plus faible, et le son, quoique moins marqué, est plus continu. En se servant d'un fil à bout arrondi, l'aigrette est encore moins sensible.

Le son, quoique plus faible, est plus élevé en hauteur, et rend un son musical distinct. Ce son est dû en réalité aux décharges successives qui, arrivant chacune à des intervalles presque égaux, font entendre une note définie dont le ton monte avec l'accroissement de rapidité et la régularité des décharges intermittentes. Ce ton donne une mesure facile et exacte des intervalles.

L'aigrette est donc, en réalité, une décharge entre un corps mauvais conducteur et un corps non conducteur, ou bien entre un corps conducteur et un corps qui ne l'est pas. Dans les circonstances ordinaires, l'aigrette est une décharge entre un corps conducteur et l'air.

Dans l'air raréfié, les apparences de l'aigrette varient beaucoup selon les circonstances. Quelquefois une aigrette peut être composée de six à sept branches larges, très-lumineuses, d'une couleur pourpre en quelques parties distantes de plusieurs centimètres.

Fig. 101.



Lorsqu'on transmet l'électricité dans des tubes de verre terminés par deux plaques de cuivre A et *a* munies de pointes en leur milieu et dans lesquels on raréfie l'air, quand la diminution de pression n'est pas très-grande on a des rayons lumineux se ramifiant sur les parois du tube vers la plaque négative; mais, à mesure que l'épuisement est plus complet, la distinction des tranches devient moindre, et à la fin toute la surface intérieure du verre est couverte d'une lumière blanche comme dans l'œuf électrique.

M. Faraday a obtenu l'aigrette non-seulement dans l'air et les gaz, mais encore dans des milieux plus denses que l'air, tels que l'essence de térébenthine, etc. L'aigrette dans les gaz a des caractères spécifiques indiquant que la nature du gaz a une influence plus marquée que dans la production de l'étincelle. Cet effet contraste avec le résultat obtenu quand on forme l'aigrette avec diverses substances, telles que le bois, le carton, le charbon, le nitre, etc.; dans ce cas, on n'a d'autre variation que celle qui dépend de la conductibilité.

L'effet général de diminution de pression est le même pour tous les gaz : il se manifeste d'abord des étincelles dans les milieux raréfiés, qui se convertissent graduellement en aigrettes, lesquelles deviennent plus grandes et plus distinctes dans leurs ramifications, jusqu'à ce qu'à un degré de raréfaction plus grand, ces dernières

commencent à se fondre l'une dans l'autre, et finissent par donner un rayon lumineux continu entre les conducteurs.

Passons en revue différents gaz :

Air. On obtient facilement des aigrettes positives pourpres à des pressions ordinaires.

Oxygène. A des pressions ordinaires, l'aigrette est très-comprimée et d'une couleur blanche foncée. En raréfiant ce gaz, la couleur devient un peu purpurine : mais tous ces caractères sont bien pâles, comparés à ceux qui ont lieu dans l'air.

Azote. Il donne des aigrettes à la surface positive avec plus de facilité que les autres gaz. Dans l'azote raréfié, elles sont magnifiques.

Hydrogène. A des pressions ordinaires, les aigrettes sont plus belles que dans l'oxygène ; la couleur est d'un vert gris. Dans l'hydrogène raréfié, cette couleur se maintient.

Oxyde de carbone. Les aigrettes sont plus difficiles à produire dans ce gaz. Elles sont en général courtes, fortes, d'une couleur verte, et possèdent le caractère de l'étincelle.

En général, dans tous les gaz, les diverses espèces de décharges peuvent se rattacher les unes aux autres, de telle sorte qu'on les suit graduellement, quand elles passent de l'une à l'autre, depuis l'étincelle jusqu'à la lueur. On reconnaît en même temps que chaque décharge possède un caractère spécifique pendant tout le temps qu'elle prédomine.

Il y a une différence très-frappante quand on observe l'aigrette dans l'air aux surfaces positive et négative. On disait jadis qu'une pointe chargée positivement donnait des aigrettes dans l'air, tandis que la même pointe chargée négativement donnait une étoile ou point lumineux; mais si des pointes métalliques s'avancent dans l'air libre, leurs lumières positive et négative diffèrent très-peu en apparence, et l'on ne peut observer entre elles une différence qu'après un examen attentif. L'effet néanmoins varie beaucoup suivant diverses circonstances. En général, les effets produits montrent que la surface négative tend à conserver sans changement son caractère de décharge, tandis que la surface positive dans les mêmes circonstances admet de grandes variations. Le caractère de l'aigrette négative n'est pas affecté par la nature chimique des conducteurs, mais bien par leur pouvoir de conductibilité.

La raréfaction de l'air autour d'une balle négative ou d'une pointe émoussée facilite le développement de l'aigrette négative ; l'effet paraît plus grand que dans l'aigrette positive. Dans l'air, la

supériorité de l'aigrette positive est bien connue; dans l'azote, elle est aussi grande et même plus que dans l'air. Dans l'hydrogène, l'aigrette positive perd une partie de sa supériorité, tandis que l'aigrette négative ne paraît pas affectée; dans l'oxygène, l'aigrette positive est comprimée et faible, l'aigrette négative, au contraire, ne faiblit pas. Dans le gaz oxyde de carbone, les aigrettes sont difficiles à produire, comparativement à celles qu'on obtient dans l'azote; l'aigrette positive n'est pas beaucoup plus caractérisée que l'aigrette négative à des pressions ordinaires ou inférieures. Il en est de même dans le gaz acide carbonique. Dans le gaz acide chlorhydrique, l'aigrette positive est très-peu supérieure à l'aigrette négative, et toutes les deux sont difficiles à produire.

En résumé, on trouve que, bien qu'il y ait une différence générale en faveur de l'aigrette négative sur l'aigrette positive, cette différence atteint son maximum dans l'azote et l'air, tandis que dans le gaz acide carbonique, le gaz chlorhydrique, le gaz oxyde de carbone, elle diminue et devient nulle. Tous ces effets paraissent donc dépendre des rapports qui existent entre les forces électriques et les molécules de la matière soumise à leur action. Ces effets présentent encore de grandes différences, selon que les balles sont inductrices ou induites (voir page 40 et suivantes). Une balle induite, rendue positive, donne une étincelle presque une fois aussi longue que celle qui est produite quand la boule est inductrice et positive : il se manifeste, dans les mêmes circonstances, quoique d'une manière moins marquée, une différence semblable avec des balles électrisées négativement, selon qu'elles sont inductrices ou induites.

M. Faraday a été conduit à ces conséquences : 1° que deux surfaces également conductrices, placées dans l'air et électrisées au même degré, l'une positivement, l'autre négativement, celle qui est négative se décharge dans l'air à une tension un peu plus basse que celle qui est nécessaire pour la surface positive; 2° que, lorsque la décharge a lieu, il s'en dégage davantage, dans le même temps, de la surface positive que de la surface négative. Ces résultats sont à prendre en considération dans l'explication des effets observés par M. Belli (voir p. 283).

Quant à l'influence de la nature du gaz, il paraît qu'à la même pression extérieure la petite balle négative a un avantage décidé pour faciliter la décharge sur la petite balle positive, dans quelques gaz, comme l'acide carbonique et l'oxyde de carbone, tandis que, dans quelques autres, c'est la balle positive qui peut être supérieure.

Étincelle électrique. L'étincelle électrique se produit dans un grand nombre de circonstances et avec différentes sources électriques, telles que, les machines ordinaires, les appareils d'induction, et les piles même, lorsqu'elles sont composées d'un nombre considérable d'éléments et bien isolées ; cela revient à dire que lorsque la tension électrique est suffisante, quelle que soit la source d'électricité, les mêmes effets se manifestent.

La longueur, la couleur, la forme même des étincelles, dépendent du milieu où elles se produisent, de sa densité et de la nature des conducteurs. Nous allons étudier successivement les différentes conditions qui peuvent se présenter.

Nous devons d'abord signaler ce fait, que les étincelles peuvent se produire au milieu des liquides et même des solides, comme à travers les gaz, mais avec plus ou moins de facilité. Ainsi les étincelles se manifestent dans l'eau, l'essence de thérébentine, l'huile d'olive, la résine, le blanc de baleine et le verre lui-même. Dans ce cas, ce sont les particules solides ou liquides interposées entre les conducteurs qui sont momentanément élevées à l'incandescence, au lieu d'être les particules gazeuses, comme lorsque l'étincelle éclate dans l'air.

L'étincelle excitée entre des conducteurs métalliques par des machines ordinaires se présente comme un trait de feu rarement rectiligne, mais bien fréquemment en zigzags ; cet effet est d'autant plus marqué que la longueur de l'étincelle est plus grande. On attribue ce résultat à ce que l'électricité suit toujours la ligne de moindre résistance, et que l'inégalité de la couche d'air interposé, provenant, soit des particules diversement conductrices qui s'y trouvent, soit de la condensation des parties où l'étincelle a commencé à éclater, fait dévier la décharge dans un sens ou dans un autre, suivant des directions qu'il est impossible à prévoir *à priori*. Les éclairs, comme on le verra dans le livre suivant, reproduisent ce phénomène sur une grande échelle.

La bouteille de Leyde étincelante et les tableaux étincelants donnent le moyen d'exagérer la disposition sinueuse des étincelles, et montrent qu'un milieu inégalement conducteur qui sépare deux conducteurs de décharge produit des effets analogues à celui qui se manifeste habituellement dans l'air. Ces appareils sont des condensateurs dont une des armatures est remplacée par une couche de vernis sur laquelle se trouve une poudre métallique, ou de l'aventurine. Dans la bouteille étincelante, c'est l'armature exté-

rieure qui est ainsi disposée, mais à la partie inférieure se trouve toujours une lame d'étain qui communique au sol; quant au bouton qui est en relation avec la garniture intérieure, il est plus rapproché de l'extrémité supérieure de la couche de vernis que ne le sont habituellement les boutons des bouteilles de Leyde des armatures. Lorsqu'on suspend la bouteille au conducteur d'une machine par son bouton, la base de la garniture extérieure touchant au sol, et que l'on essaye de charger le condensateur, on voit des étincelles éclater sur la surface extérieure dans toutes les directions, et la charge de l'appareil ne peut avoir lieu. Cet effet provient de ce que les parcelles métalliques agissent par influence comme un conducteur imparfait, et servent à décharger continuellement le condensateur.

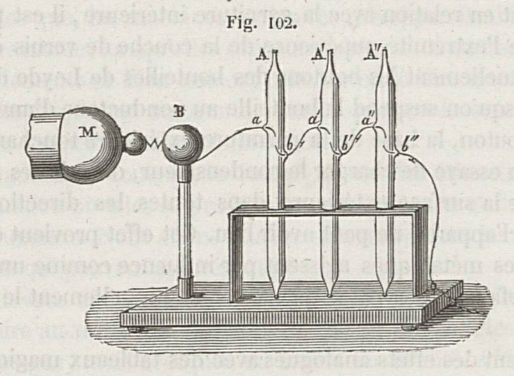
On obtient des effets analogues avec des tableaux magiques étincelants, c'est-à-dire avec des condensateurs à carreaux de verre dont une des faces est disposée comme la garniture extérieure de la bouteille de Leyde.

Étincelle dans différents gaz. Dans l'air, à la pression ordinaire, les étincelles ont une lumière intense et une couleur bleue bien connue; on aperçoit souvent des parties claires ou obscures dans le trajet, quand la quantité de l'électricité est peu considérable. Dans l'azote, elles sont belles et ont la même apparence que dans l'air, mais leur couleur est franchement bleue ou pourpre, et elles sont accompagnées d'un son très-remarquable. Dans l'oxygène, elles sont plus blanches que dans l'air o udans l'azote, mais aussi brillantes. Dans l'hydrogène, elles présentent une belle couleur cramoisie, qui n'est pas due à sa faible densité, puisque ce caractère s'efface quand l'atmosphère est raréfiée; le son est faible, ce qui est une conséquence des propriétés physiques de ce gaz. Dans le gaz acide carbonique, la couleur est comme dans l'air, mais avec une teinte verte, et les étincelles sont plus irrégulières. Dans le gaz chlorhydrique sec, l'étincelle est presque toujours blanche sans partie obscure. Dans le gaz oxyde de carbone, elle est quelquefois verte, rouge, et tantôt l'un, tantôt l'autre; quelquefois on aperçoit des parties noires dans la ligne de l'étincelle.

Il est facile de montrer par une expérience très-simple l'influence des milieux sur la lumière de l'étincelle électrique. On prépare plusieurs tubes, comme il a été dit page 294, et comme on le voit représenté figure 90, de façon à pouvoir introduire dans ces tubes des gaz différents, et à faire éclater des étincelles au milieu à l'aide

de fils de platine soudés dans ces tubes. On place plusieurs de ces tubes à côté l'un de l'autre en A, A', A'', de manière que le fil de

Fig. 102.



platine *b* du premier touche le fil *a'* du second, que *b'* du second touche *a''* du troisième, etc. On fait communiquer un fil *a* avec une boule de cuivre isolée B, et le fil *b''* avec le sol ; si alors on fait éclater une série d'étincelles entre la boule B et une machine électrique M, quand la distance entre B et M est suffisante, à chaque décharge il éclatera simultanément une étincelle dans chaque tube A, A', A''. De plus, ces étincelles seront données par la même quantité d'électricité et auront la même longueur si les fils de platine sont semblablement placés dans les tubes. Il est nécessaire dans ces expériences de faire éclater la décharge entre une boule B et une machine ; sans cela les étincelles ne passeraient pas en approchant les fils de platine des conducteurs.

Si les tubes A, A', A'' sont pleins d'air, les étincelles ont le même éclat ; si le premier est rempli d'hydrogène, le deuxième de chlore, le troisième d'oxygène, on observe les effets qui ont été indiqués précédemment, c'est-à-dire que dans l'hydrogène la lumière de l'étincelle est rouge pourpre ; dans le chlore, verdâtre ; dans l'oxygène, plus blanche. Les autres gaz donneront des teintes différentes, comme on l'a dit plus haut. Ainsi la lumière devient blanche et brillante dans un gaz dont la densité est grande, tandis qu'elle s'affaiblit ou prend une teinte rougeâtre dans un milieu dont la densité est plus faible (E. Becquerel).

Décharges obscures. Il faut remarquer que, dans l'expérience précédente, c'est la même quantité d'électricité qui passe dans les tubes et qui donne lieu simultanément à des étincelles de même longueur; l'intensité lumineuse n'étant pas la même, il faut en con-

clure qu'une portion de la décharge passe, dans certains cas, sans produire d'effets lumineux. Du reste, les phénomènes auxquels on a donné le nom de décharges obscures indiquent le passage de l'électricité au travers des gaz sans effets lumineux, ou du moins avec des effets lumineux beaucoup plus faibles que ceux qui se produisent à côté par l'action de la même quantité d'électricité.

Nous citerons à ce sujet une expérience faite par M. Faraday : Soient deux tiges de cuivre de 8 millimètres de diamètre, entrant dans une cloche de verre par une de leurs extrémités, et mises ensuite en contact; on raréfie l'air dans l'intérieur de la cloche, puis on fait passer une décharge de la machine entre les tiges, et, pendant qu'elle est continue, les extrémités sont séparées l'une de l'autre. Au moment de la séparation une lueur continue a lieu sur le bout de la tige négative, tandis que l'extrémité positive reste tout à fait obscure. A mesure que la distance augmente, une traînée de lumière pourpre ou blanche paraît à l'extrémité de la tige positive et s'avance directement vers la tige négative; elle s'allonge à mesure que l'intervalle s'élargit, mais ne se joint jamais à la lueur négative, en sorte qu'il y a toujours entre elles un petit espace obscur. Cet espace, d'environ un millimètre et plus, est invariable en apparence dans son étendue et sa position relativement à la tige négative. Le même effet se produit, que le bout négatif soit inducteur ou induit.

Nous avons observé des effets à peu près analogues dans l'air, en étudiant le développement de l'étincelle à mesure que la distance entre les deux boules chargées d'électricité contraire augmente. Quand on examine avec attention l'étincelle produite par la décharge de deux conducteurs chargés d'électricité contraire qui leur est fournie continuellement, comme les conducteurs de la machine de Nairne en action, on observe les effets suivants : lorsque les deux conducteurs sont terminés par deux boules d'égal diamètre, placées à 4 ou 6 millimètres de distance, l'étincelle est constituée comme il suit : du côté négatif, un point lumineux bien prononcé; du côté positif, également un point lumineux, mais moins fort, et entre les deux une partie sombre violacée. Si l'on vient à écarter les conducteurs, la partie lumineuse négative se sépare en deux parties qui s'éloignent de plus en plus à mesure que l'on écarte les deux boules. L'étincelle est alors composée de trois parties lumineuses et de deux parties sombres violacées. A mesure que l'on écarte les boules, la partie lumineuse qui s'est

détachée du conducteur négatif se rapproche de la lueur, positive et finit par se joindre à elle. Alors il ne reste plus qu'une très-faible lueur du côté négatif, et une très-forte lueur du côté positif. Les étincelles acquièrent une telle intensité qu'il est difficile d'apercevoir aucune différence entre leurs parties (Becquerel et E. Becquerel).

Dans différents gaz, la décharge obscure diffère, à certains égards, de celle qui a lieu dans l'air (Faraday). Les deux surfaces arrondies indiquées plus haut ayant été placées dans du gaz chlorhydrique, à la pression de $0^m,150$ de mercure, on a eu de brillantes étincelles en faisant passer un courant électrique continu, tant que l'intervalle n'a été que de $0^m,027$ ou au-dessous; mais au-dessus elles ont été remplacées par des aigrettes ramassées, intermittentes, avec des lueurs sur les deux surfaces et une partie obscure entre elles. Quand le courant, dans la machine, était simplement une étincelle, alors chaque étincelle produisait une décharge à travers l'acide chlorhydrique, qui, à un certain intervalle, devenait très-brillant; à un intervalle plus grand encore, il se manifestait une faible aigrette à l'extrémité inductrice positive, et une lueur à l'extrémité induite négative. La partie obscure se terminait entre les deux.

L'hydrogène donne fréquemment des étincelles particulières dont une partie est d'un rouge brillant, tandis que l'autre est d'un gris pâle, ou bien toute l'étincelle est faible et d'un caractère particulier.

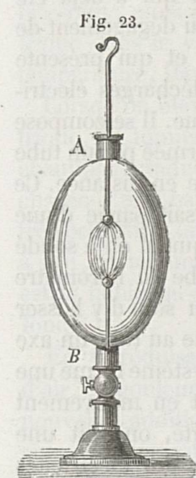
L'azote présente une décharge bien remarquable entre les deux boules, dont les diamètres sont de 6 millimètres et de 56 millimètres, lorsque la plus petite est rendue négative directement ou par induction. La décharge particulière se présente à des intervalles entre $0^m,0176$ et $0^m,018$ et même $0^m,0378$. Quand la grande balle est inductrice positivement, elle consiste en une petite aigrette partielle sur la petite boule négative; il y a ensuite un espace obscur, et enfin une ligne droite sur la grande boule positive. La position de l'espace obscur, quand la lueur est négative, est constante.

Il est donc établi par là que l'électricité peut passer à travers certaines masses de gaz en ne donnant lieu qu'à des phénomènes lumineux peu intenses.

Etincelle dans les gaz raréfiés. La pression des gaz ou des vapeurs au milieu desquelles les étincelles éclatent a une influence non moins grande que leur nature sur les effets obtenus. La quantité d'électricité nécessaire pour produire une étincelle d'une longueur

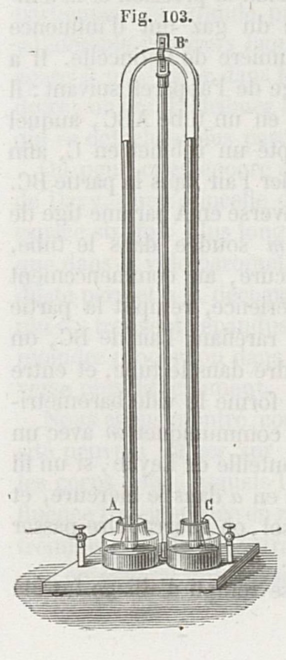
constante est sensiblement proportionnelle à la pression du gaz (voir page 43); mais en outre de cela, s'il faut moins d'électricité pour produire une longue étincelle, la lumière électrique donne de grandes aigrettes ou même des lueurs comme l'œuf électrique en a déjà offert un exemple. Cet appareil, représenté ci-contre, se compose d'un ballon de forme ovoïde AB, dans lequel on peut raréfier l'air à volonté. Deux tiges terminées par des boules passent à frottement dans des boîtes à cuirs fixées aux deux douilles A et B. En mettant la tige supérieure en communication avec le conducteur d'une machine et l'autre avec le sol, si le vide est fait dans le ballon et qu'on opère dans l'obscurité, on voit un globe de feu de teinte bleuâtre ayant la forme du vase qui va d'une sphère conductrice à l'autre. Si on fait rentrer un peu d'air, la teinte est plus vive mais l'espace lumineux est moins grand; avec une pression intérieure plus forte, on aperçoit des coruscations ou des aigrettes allant d'une boule à l'autre; enfin avec l'air à la pression ordinaire, si les boules sont suffisamment près, il se produit des étincelles.

Fig. 23.



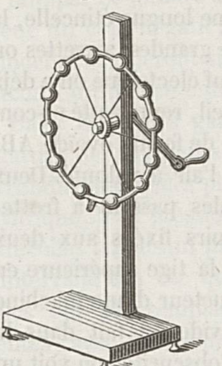
Le tube vide cité, page 339, présente des effets analogues. On peut également se servir de l'appareil nommé double baromètre, et qui montre la lueur produite par suite du passage de l'électricité au travers du vide barométrique. Il se compose d'un tube recourbé ABC, dont les deux branches ayant une longueur supérieure à 76 centimètres, forment deux baromètres séparés par une partie coudée. Ces tubes plongent dans deux vases pleins de mercure et isolés A et C. L'un communique avec un conducteur d'une machine électrique; l'autre avec le sol. Quand on opère dans l'obscurité, on voit une lueur dans l'espace vide B, et qui provient du passage de l'électricité au travers de l'espace qui sépare les parties supérieures des deux colonnes mercurielles.

Fig. 103.



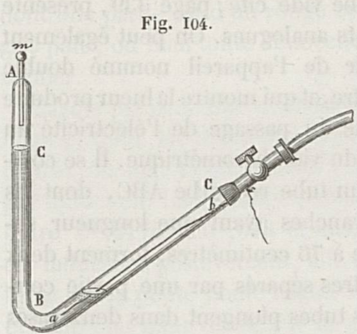
On peut également employer un petit appareil qui a déjà été figuré page 124, à propos du dégagement de l'électricité par frottement, et qui présente facilement l'apparence des décharges électriques dans le vide barométrique. Il se compose d'une petite roue en verre, formée par un tube recourbé et renflé de distance en distance. Ce tube, avant d'être fermé, faisait partie d'une chambre barométrique, et, quand on a soudé au chalumeau la partie du tube du baromètre auquel elle tenait, on avait eu soin d'y laisser un peu de mercure. On adapte au tube un axe muni d'une manivelle, et ce système forme une petite roue vide que l'on met en mouvement avec la main. Si on la fait tourner dans l'obscurité, on voit une lueur se produire dans tout le tube; elle provient des électricités dégagées dans le frottement du mercure intérieur contre les parties du verre, et qui se réunissent continuellement. La cause du phénomène est la même que lorsqu'on agite la colonne mercurielle d'un baromètre; on aperçoit une lueur au haut du tube.

Fig. 49 bis.



Les expériences de Davy montrent combien la pression et la température du gaz ont d'influence sur la lumière de l'étincelle. Il a fait usage de l'appareil suivant : il consiste en un tube ABC, auquel est adapté un robinet en C, afin de raréfier l'air dans la partie BC. Il est traversé en A par une tige de platine *m* soudée dans le tube. Du mercure, au commencement de l'expérience, remplit la partie AB. En raréfiant l'air de BC, on force la colonne mercurielle AB à descendre dans le tube, et entre le mercure C et la tige de platine *m* il se forme le vide barométrique. On comprend dès lors qu'en faisant communiquer *m* avec un corps électrisé ou avec le bouton d'une bouteille de Leyde, si un fil de platine *ba*, attaché au robinet, plonge en *a* dans le mercure, et fait communiquer dès lors celui-ci avec le sol, on pourra faire passer l'électricité au travers de l'espace vide AC.

Fig. 104.



Cet appareil peut se placer dans un vase rempli d'alliage fusible

qui élève sa température, ou bien être plongé dans un mélange réfrigérant; ainsi on peut étudier la production de la lumière électrique dans le vide mercuriel en faisant varier les conditions de température. Davy, en opérant ainsi, a obtenu les résultats suivants:

Lorsqu'on élève la température du mercure dans le vide barométrique, la lumière électrique se montre d'une couleur verte; en chauffant graduellement jusqu'à l'ébullition du mercure, la décharge d'une batterie de quelques bocaux y produit une lumière très-éclatante, tandis qu'en refroidissant le mercure on l'affaiblit peu à peu, et tellement, qu'à 20 degrés au-dessous de zéro, la lumière est si faible qu'elle n'est visible que dans une obscurité très-profonde.

En introduisant dans le vide mercuriel la plus petite quantité d'air, la couleur ordinaire change du vert au vert de mer; par de nouvelles additions, elle passe au bleu et au pourpre. En faisant le vide au-dessus de l'alliage fusible, afin de ne pas avoir sensiblement de matières pondérables dans le vide, la lumière est pâle et d'un jaune paille. Lorsque le vide est fait sur l'huile d'olive et le chlorure d'antimoine, la lumière, dans le dernier cas, est plus marquée qu'avec l'huile.

On voit par là que les propriétés lumineuses de l'électricité appartiennent en grande partie ou plutôt dépendent de la matière pondérable à travers laquelle les décharges sont transmises. Si on aperçoit une lueur dans le vide le plus parfait que l'on puisse produire, on doit l'attribuer à des quantités inappréciables de matières qui se détachent des parois des vases dans lesquels on fait le vide.

On peut citer encore à l'appui de cette conclusion l'observation de Davy, que l'étincelle d'une bouteille de Leyde peut franchir un espace six fois plus long dans le vide de la machine pneumatique que dans le vide barométrique; ainsi le premier contenant de l'air dilaté permet à la décharge de s'opérer entre les éléments gazeux qui s'y trouvent répandus, tandis que ces éléments n'existant qu'en moindre proportion dans le vide barométrique, l'électricité le traverse plus difficilement.

Nous avons montré comment la nature des milieux et leur densité peuvent influer sur la lumière émise par les étincelles, mais les corps entre lesquels la décharge éclate ont également une influence très-marquée en raison des particules arrachées de leurs extrémités et qui sont entraînées à l'état d'incandescence. On remarque en général que la lumière électrique est d'autant plus brillante

que les corps entre lesquels elle se produit conduisent mieux l'électricité; avec des corps mauvais conducteurs elle s'affaiblit et prend une teinte violacée rouge. Mais on verra plus loin, quand nous parlerons de la composition de la lumière électrique, combien est grande l'influence des corps entre lesquels elle se produit.

Mesure de l'intensité des étincelles électriques. Nous venons de voir précédemment que la même quantité d'électricité pouvait donner lieu à des effets différents, suivant la nature des milieux et des conducteurs; mais il était important de pouvoir mesurer l'intensité des étincelles, afin de comparer leur puissance lumineuse dans ces diverses circonstances. M. Masson a atteint ce but en faisant usage d'un photomètre électrique qu'il a imaginé, et que nous allons faire connaître.

Voici le principe sur lequel repose la construction de cet appareil :

Un disque de papier sur lequel on a tracé des secteurs noirs et blancs d'égale dimension, se mouvant avec une rapidité suffisante, paraît d'une teinte uniforme et grisâtre, si on l'éclaire avec une lumière blanche permanente. Ce phénomène bien connu est dû à la persistance de la sensation lumineuse sur la rétine. Lorsqu'au lieu d'une lumière fixe, on emploie une lumière instantanée pour éclairer les secteurs, on aperçoit le disque comme s'il était fixe, les secteurs n'ayant pu se déplacer sensiblement pendant la durée de la lumière. L'œil apercevant dans ce cas, et avec une grande netteté, tous les détails du disque, nous acquérons déjà une notion sur son extrême sensibilité et sur la rapidité avec laquelle s'exerce la perception des objets et se forme notre jugement sur leur nature. Si le disque éclairé par une lumière permanente est subitement illuminé par une lumière instantanée, une étincelle électrique par exemple, on verra, pour une intensité convenable de cette dernière, apparaître les secteurs. Si l'on affaiblit successivement la lumière instantanée, il arrivera un instant où les secteurs disparaîtront, et le disque paraîtra éclairé d'une teinte uniforme. Dans ce cas, la lumière instantanée est une fraction de la lumière permanente, variable avec l'œil de l'opérateur, mais invariable pour un même œil, les circonstances de vision restant les mêmes. En effet, à cause de la persistance de la sensation, la place qu'occupe un secteur noir, ne réfléchissant pas la lumière de l'étincelle, a conservé l'éclairement primitif du fond; celle qu'occupe un secteur blanc renvoie à l'œil autant de lumière que la première, plus la lumière due à l'étincelle. Quand l'intensité de cette

dernière représentera la limite de sensibilité de l'œil de l'observateur, le disque paraîtra uniformément éclairé. Le rapport entre les intensités des éclairements des secteurs noirs et blancs au moment où l'on cesse de les distinguer, peut varier de $\frac{1}{50}$ à $\frac{1}{120}$, suivant la sensibilité de l'œil de l'observateur. Quant au rapport entre l'intensité de la lumière de l'étincelle et celle de la lumière fixe, il dépend des dimensions des secteurs noirs et blancs.

Supposons maintenant que l'observateur qui étudie l'intensité des étincelles se place à une distance fixe du disque éclairé par celles-ci et par la lumière artificielle qui sert de terme de comparaison, et qu'il approche ou éloigne cette lumière artificielle jusqu'à ce qu'il soit arrivé au point où les secteurs ne soient plus distincts sur la roue en mouvement quand l'étincelle éclate, on mesurera simplement la distance de la lumière artificielle à l'écran, et cette distance servira à comparer les intensités lumineuses de l'étincelle avec celle d'autres étincelles produites entre les boules de l'excitateur placé à la même distance du disque.

M. Masson, à l'aide de cet appareil, a obtenu les résultats suivants :

1° Les intensités de l'étincelle électrique sont proportionnelles aux carrés des distances d'explosion.

2° Les intensités sont proportionnelles aux surfaces des condensateurs qui donnent les décharges.

3° Les intensités sont en raison inverse des épaisseurs des condensateurs (*).

4° Lorsque des décharges de batteries produisent de la lumière dans un point d'interruption du circuit et de la chaleur dans un fil faisant partie de ce même circuit, les quantités de chaleur sont proportionnelles aux quantités de lumière.

(*) Ces trois lois sont comprises dans la formule suivante :

$$I = H \frac{X^2 S}{Y^2 e}$$

I étant l'intensité de l'étincelle, H étant coefficient constant, X la distance d'explosion, S la surface des condensateurs, Y la distance de l'étincelle au photomètre, e l'épaisseur du condensateur.

On peut remplacer la formule par celle-ci :

$$i = \frac{pq^2}{S}$$

p étant une constante, q la quantité d'électricité accumulée et S la surface du condensateur, la distance de l'étincelle à l'observateur étant supposée constante.

Effets lumineux de l'arc voltaïque. Nous venons de voir comment l'étincelle électrique variait d'éclat et de couleur dans différentes circonstances; mais les observations faites avec l'arc voltaïque ont conduit également à des résultats importants à connaître.

Nous parlerons d'abord des effets observés à l'aide des décharges que l'on obtient avec les appareils d'induction. Ces appareils n'ont pas encore été décrits; mais comme les effets dont il va être question sont relatifs au sens du courant et aux propriétés lumineuses des décharges électriques, nous pensons devoir indiquer les effets observés quand on les emploie, en remettant plus loin leur description.

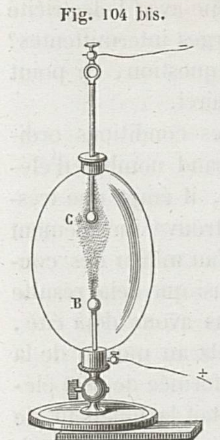
En examinant au microscope les étincelles qui s'échappent entre une pointe en platine et une lame métallique oscillante d'un appareil d'induction, étincelle provenant du courant d'induction lui-même, M. Neeff remarqua le premier que la pointe devenait successivement lumineuse et obscure, suivant la direction imprimée au courant; la lumière émise était violette, et la pointe était lumineuse quand l'électricité négative débouchait par son extrémité. Il en conclut que la lumière prenait naissance au pôle négatif, et que la chaleur était la propriété du pôle positif; en outre de cela, il expliquait le transport des matières dans l'arc voltaïque du pôle + au pôle — par la désagrégation au pôle + résultant d'un excès de chaleur, qui mettait les particules en état d'être transportées. Mais ces conclusions étaient beaucoup trop absolues. Si on observe les effets dans ces circonstances, il y a des conditions, comme nous allons le voir, où le pôle + est également lumineux. En outre, le transport des matières du pôle + au pôle — est intimement lié au mouvement de l'électricité, puisqu'il s'observe également lors du passage des courants électriques au travers des liquides.

Le phénomène de différence de lumière aux deux pôles est très-curieux en ce qu'il montre les différences produites suivant le sens du courant; on peut les obtenir avec beaucoup d'intensité en opérant avec un appareil d'induction d'une puissance plus grande que le précédent, et construit par M. Rhumkorf, d'après les travaux de MM. Delarive, Masson et Breguet. Cet appareil remarquable, que la science doit à l'habile constructeur que nous venons de nommer, sera décrit dans le troisième volume; il donne un courant par induction capable de fournir des étincelles ou un arc continu suivant les distances des conducteurs. On peut suivre même ce passage de la succession des étincelles à l'arc voltaïque en approchant

graduellement les deux conducteurs qui terminent le fil parcouru par le courant d'induction depuis quelques millimètres où les étincelles se produisent, jusque vers 1 millimètre ou un demi-millimètre dans l'air où leur succession est si rapide qu'elles constituent un arc; en même temps les effets de chaleur, de fusion et de transport commencent à se manifester. Nous verrons plus tard comment les effets varient avec le nombre des éléments de la pile servant à activer l'appareil, et suivant les dispositions que l'on emploie. Nous supposerons ici que l'effet lumineux soit simplement obtenu à l'aide de trois ou quatre couples à acide nitrique.

Lorsqu'on opère dans les gaz raréfiés, l'arc peut se produire à une distance assez grande. Pour cela on dispose sur la platine d'une machine pneumatique un œuf électrique contenant deux boules en cuivre C, B ; on peut ainsi raréfier plus ou moins le gaz intérieur. Les deux boules métalliques peuvent être mises en communication avec les extrémités du fil donnant le courant par induction, et par conséquent être rendues successivement positives ou négatives.

Fig. 104 bis.



Si après avoir fait le vide à 1 ou 2 millimètres de pression, on établit la communication entre les tiges et l'appareil, on voit l'arc s'établir aussitôt, même lorsque les boules sont à 2 ou 3 décimètres de distance. En outre, la boule négative C et la tige à laquelle elle est attachée est entourée d'une auréole lumineuse bleuâtre; la boule positive B est le point de départ d'une gerbe couleur violette rougeâtre. L'effet est d'autant plus beau et la gerbe plus large, que le vide est plus parfait. Si l'air rentre peu à peu dans l'appareil, l'arc devient d'un moindre diamètre, et la boule négative n'est pas partout entourée d'une auréole bleuâtre; enfin l'électricité peut cesser de passer si la pression intérieure n'est pas très-faible. Ainsi, on trouve là encore, comme avec l'appareil de M. Neeff, le pôle négatif lumineux; mais la boule positive est aussi le point de départ de l'arc de lumière. La différence dans la manière dont se manifestent les effets lumineux aux deux pôles est frappante.

Lorsqu'on fait varier la nature des milieux raréfiés dans cette expérience, il se produit un phénomène extrêmement remarquable.

En mettant dans l'appareil de la vapeur d'essence de térébenthine, puis raréfiant le gaz avec le plus grand soin, au moment où l'on établit la communication entre l'appareil d'induction et les conducteurs C et B, l'intervalle qui se trouve entre les deux boules paraît lumineux, mais il est séparé en strates perpendiculaires à la ligne qui joint les boules, ou horizontales d'après la disposition de l'appareil; les strates sont d'autant plus séparées que le vide est mieux fait. Le phénomène cesse quand il a duré pendant quelques instants; il se renouvelle en introduisant de nouveau de la vapeur d'essence. Est-ce une polarité des particules très-raréfiées d'essence qui se manifeste? ou bien cet effet provient-il de ce que l'arc n'est pas dû à un courant continu d'électricité, comme avec l'électricité des piles, mais bien à une succession de décharges intermittentes? On ne peut répondre, quant à présent, à cette question, ce point exigeant de nouvelles expériences pour être éclairci.

Lorsque l'on produit l'arc voltaïque dans les conditions ordinaires, à l'aide d'une pile de Bunsen d'un grand nombre d'éléments, indépendamment des effets de chaleur, il émet une très-grande quantité de lumière. Cette lumière se trouve inégalement répartie, et vers les pôles elle est plus vive qu'au milieu des conducteurs; le pôle positif est le plus brillant, ainsi que cela résulte des expériences de différents observateurs. Nous avons déjà cité, page 328, les expériences faites par M. Despretz au moyen de la pile puissante qu'il a employée, laquelle était formée de 600 éléments de Bunsen en batterie. On a vu quelle était la longueur de l'arc que l'on pouvait obtenir dans cette circonstance, puisqu'il atteignait une longueur de 18 centimètres; entre cette limite et celle de quelques millimètres se trouvent les longueurs d'arc fournis par les piles moins puissantes.

En général l'intensité lumineuse augmente peu quand on augmente le nombre des éléments de la pile, mais elle croît rapidement quand on augmente la surface des couples, ou, si l'on veut, la quantité d'électricité. Ainsi M. Despretz a trouvé, en cherchant à mesurer l'intensité de la lumière électrique dans l'arc voltaïque par différentes méthodes, au moyen de l'appréciation de la distance à laquelle on cesse de lire le plus nettement et de plusieurs procédés photométriques connus, que, lorsque les éléments sont disposés bout à bout, cette intensité croît de 50 à 100 éléments et de 100 à 600, mais d'une manière peu considérable; si, au contraire,

on réunit les éléments en quantité, de manière à doubler, à tripler, etc. la surface, l'accroissement de l'énergie lumineuse est alors appréciable par un procédé quelconque; 200 éléments mis en deux séries parallèles de 100 chacune éclairent à peu près deux fois plus que 100 éléments simples, et ainsi successivement jusqu'à 600 éléments disposés en six séries parallèles de 100.

Pour donner une idée de la quantité de lumière que peut émettre un arc, même de petite dimension, nous dirons que MM. Foucault et Fizeau ont trouvé qu'en comparant approximativement l'intensité de la lumière d'un arc voltaïque obtenu avec 50 éléments de Bunsen de petite dimension, avec la lumière solaire à midi, dans le mois d'avril, par un jour clair, la lumière solaire était deux fois et demie plus intense; mais ce nombre est très-variable, et nous ne le mentionnons que pour montrer que si l'électricité est la source artificielle calorifique la plus puissante, comme elle est aussi la source lumineuse la plus intense.

Composition de la lumière électrique. La lumière électrique, comme la lumière solaire et les lumières artificielles, n'est pas simple; elle se compose de divers rayons colorés, dépendant de la nature des corps entre lesquels éclate l'étincelle. Wollaston, qui a analysé le premier cette lumière, a reconnu que le spectre résultant de son passage dans un prisme était formé de bandes colorées dont la composition n'était pas la même que celle de la lumière solaire.

Frauenhoffer a trouvé aussi de grandes différences avec le spectre solaire, sous le rapport des raies et des bandes. Suivant ses recherches, on distingue dans le spectre de la lumière électrique plusieurs lignes brillantes ou parties très-claires, dont l'une, qui se trouve dans le vert, est d'une clarté, pour ainsi dire, brillante en comparaison du reste du spectre. L'orangé renferme une ligne moins lumineuse, dont la couleur paraît être la même que celle de la ligne claire du spectre de la flamme d'une lampe. A peu de distance de l'extrémité du spectre, on remarque une ligne d'une teinte sombre; on voit encore facilement dans diverses parties de l'image prismatique quatre lignes bien claires. Frauenhoffer attribue la présence de ces lignes claires à une portion de lumière qui n'a pas été décomposée dans l'acte de la réfraction au travers des prismes, et qui se dessinent sur le fond moins éclairé du spectre; mais il opérait à l'aide d'une source lumineuse peu intense, qui ne lui a pas permis d'analyser complétement le phénomène.

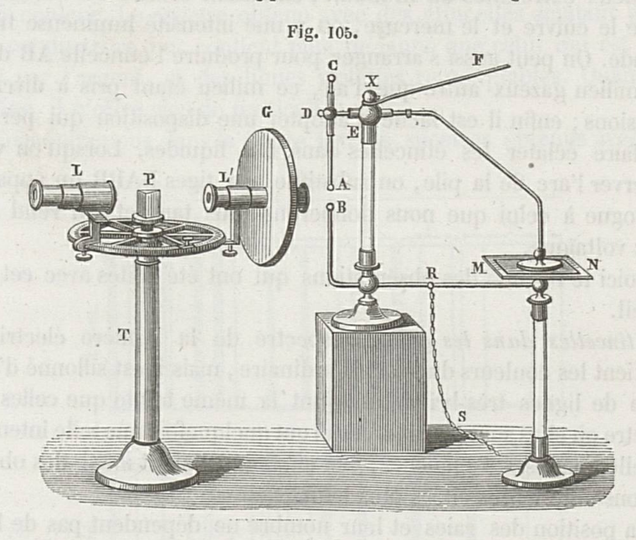
M. Wheastone, en étudiant avec un télescope muni d'un micromètre la composition du spectre de la lumière électrique provenant d'une machine électro-magnétique disposée de manière à donner une étincelle d'induction ne variant pas de position, a obtenu les résultats suivants : le spectre de l'étincelle tirée du mercure consiste en sept bandes définies séparées les unes des autres par des intervalles obscurs; elles sont composées de deux bandes orangées rapprochées l'une de l'autre, d'une bande vert brillant, de deux bandes vert-bleuâtre très-rapprochées, d'une bande pourpre très-brillante, et enfin d'une bande violette.

Dans les spectres provenant des étincelles tirées du zinc, du cadmium, du bismuth, du plomb en fusion, M. Wheastone a reconnu que le nombre, la position et la couleur des raies brillantes varient dans chaque cas. Le spectre du zinc et du cadmium donne la raie rouge qu'on ne trouve pas dans les autres spectres. Les effets ont été les mêmes, quelle que fût la source qui fournissait la lumière électrique. En opérant dans le vide barométrique, dans celui de la machine pneumatique ou dans le gaz acide carbonique, etc., les résultats ont été les mêmes que dans l'air et dans l'oxygène. Il est prouvé par là que la lumière électrique ne doit pas être considérée comme le résultat de la combustion du métal. Ce physicien a reconnu également que l'influence des métaux est tellement marquée que lorsqu'on tire l'étincelle d'alliages, on aperçoit simultanément les lignes brillantes qui appartiennent à chacun des deux métaux. Il faut donc que l'intervention de la matière pondérable du conducteur, qui est volatilisée, soit pour quelque chose, ou du moins modifie la lumière électrique. Il résulte de là, ce qui est confirmé du reste par les expériences de Fusinieri, que l'étincelle qui traverse l'air en sortant d'un conducteur métallique ou autre emporte toujours avec elle des particules matérielles.

M. Masson a étudié de nouveau la composition de la lumière électrique en variant les sources d'électricité et excitant les étincelles ou les décharges dans différents milieux et entre des conducteurs de diverse nature. Quelques-uns des résultats qu'il a obtenus sont conformes à ceux dont il vient d'être question; mais, en étendant ses recherches, il est arrivé à expliquer différentes circonstances de la production de la lumière électrique.

Voici la disposition de l'appareil dont il a fait usage :

Fig. 105.



L'étincelle électrique dont on étudie la lumière éclate entre les deux boules A et B. Ces deux boules sont placées à l'extrémité de deux tiges métalliques isolées et maintenues fixes à l'aide d'un support X ; elles sont en relation avec les deux faces d'un condensateur MN, de sorte que si la tige FC touche au conducteur d'une machine électrique et RS avec le sol, le condensateur se chargera continuellement, et l'étincelle n'éclatera entre A et B que lorsque cet appareil sera chargé. Si la machine fournit sans cesse de l'électricité, il se manifestera une succession de décharges entre A et B qui auront toujours même intensité. Cet appareil est un électromètre dans le genre de celui de Lane, décrit page 25.

La lumière électrique traverse un prisme P placé sur un goniomètre de M. Babinet T. La lunette L' renferme un collimateur à fente très-étroite, et la lunette L permet à l'observateur d'étudier le spectre successivement dans toute son étendue. Avec cette disposition on obtient une grande fixité dans le spectre. On peut avec facilité remplacer les boules A et B par des boules d'autre métal, et observer l'étincelle à la même place.

Cet appareil permet d'étudier non-seulement l'étincelle provenant d'une machine électrique ordinaire, mais celle qui résulte de l'emploi d'un appareil d'induction tel que le construit M. Rhumkorf. Il suffit de faire communiquer les deux tiges AD et BR avec

les deux extrémités du fil induit; en faisant éclater ces décharges entre le cuivre et le mercure, on a une intensité lumineuse très-grande. On peut aussi s'arranger pour produire l'étincelle AB dans un milieu gazeux autre que l'air, ce milieu étant pris à diverses pressions; enfin il est facile d'adopter une disposition qui permet de faire éclater les étincelles dans des liquides. Lorsqu'on veut observer l'arc de la pile, on substitue aux tiges DABR un appareil analogue à celui que nous donnerons plus tard et qui rend fixe l'arc voltaïque.

Voici le résumé des observations qui ont été faites avec cet appareil.

Étincelles dans les gaz. Le spectre de la lumière électrique contient les couleurs du spectre ordinaire, mais il est sillonné d'une série de lignes très-brillantes ayant la même teinte que celles du spectre où elles sont placées, et qui ont quelquefois une telle intensité qu'elles paraissent blanches; ces effets résultaient aussi des observations antérieures citées plus haut.

La position des raies et leur nombre ne dépendent pas de l'intensité de l'étincelle, qui rend seulement leur lumière plus vive en augmentant l'étendue du spectre visible. Le nombre des raies et leur position changent avec la nature des métaux entre lesquels éclate l'étincelle. A chaque métal correspond un spectre particulier, dont l'inspection seule suffit pour déterminer sa nature. Dans tous les spectres, on trouve quatre ou cinq raies qui diffèrent quelquefois par leur intensité, mais qui ne manquent jamais.

Le cadmium employé comme conducteur donne des raies bleues et vertes très-belles dans le spectre, qui est un des plus beaux que l'on puisse obtenir.

L'antimoine produit beaucoup plus de raies brillantes que les autres métaux et sans couleur dominante; l'étincelle est très-blanche. Le bismuth présente le même caractère.

Le plomb donne à l'étincelle une lumière dont le spectre est remarquable par son étendue violette et les belles raies que présente cette couleur.

Le zinc est caractérisé par le vert pomme très-étendu de son spectre.

Le charbon est remarquable par la multitude de raies brillantes qu'il présente.

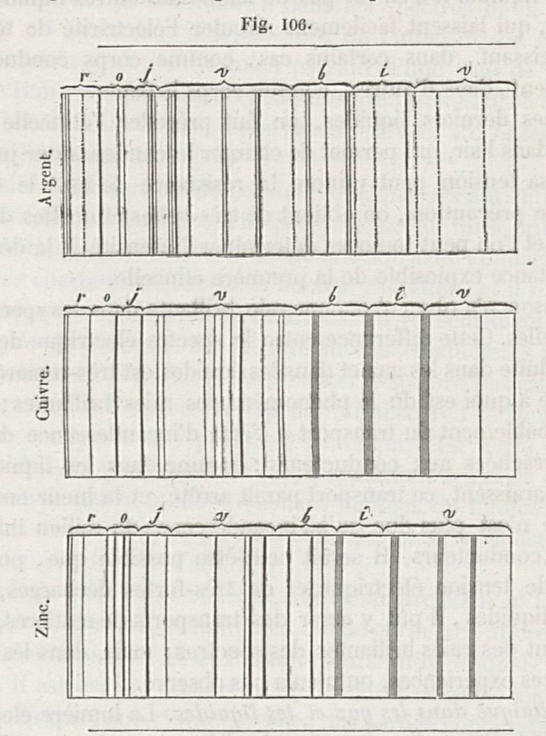
Le fer et l'étain n'offrent rien de particulier.

Le spectre produit entre des conducteurs en argent est caracté-

risé par une teinte verte très-intense et par plusieurs lignes de cette couleur. Le spectre obtenu avec des étincelles éclatant entre des conducteurs d'or contient plus de jaune que celui qui est produit par l'argent, et des lignes violettes remarquables. Quant au platine, il n'offre rien de particulier.

Nous indiquons dans la figure 106 les spectres obtenus avec des

Fig. 106.



conducteurs en argent, en cuivre et en zinc ; les lettres *r*, *o*, *j*, *v*, etc. indiquent les régions où se trouvent les couleurs rouge, orangée, jaune, verte, etc., et les lignes noires représentent la position des lignes brillantes des spectres. On reconnaît les indications données plus haut et entre autres le zinc donnant des lignes vertes brillantes et bleues bien caractérisées.

Les raies sont les mêmes dans les différents gaz que dans l'air, ainsi que l'avait déjà observé M. Wheastone. La combustion n'a donc aucune influence sur l'effet produit ; du reste, le platine, l'or, présentant des raies brillantes, cela seul donnait à penser que

la combustion des métaux n'était pas la cause du phénomène.

Étincelle dans les liquides. Plusieurs liquides, comme l'essence de térébenthine, sont assez isolants pour permettre une décharge immédiate, sans l'intermédiaire d'une autre étincelle, c'est-à-dire qu'on peut faire passer directement la décharge du condensateur à travers le liquide. Il n'en est pas de même des autres liquides, tels que l'eau, qui laissent facilement circuler l'électricité de tension, et qui agissant, dans certains cas, comme corps conducteurs, fonctionnent, dans d'autres, comme corps isolants.

Pour ces derniers liquides, on fait précéder l'étincelle d'une étincelle dans l'air, qui permet de charger le condensateur jusqu'au point où sa tension peut vaincre la résistance de tout le circuit. Avec cette précaution, on obtient de très-belles étincelles dans les liquides, et l'on peut toujours déterminer l'intensité de la décharge par la distance explosible de la première étincelle.

M. Masson n'a observé aucune raie brillante dans les spectres de ces étincelles. Cette différence entre le spectre électrique de l'étincelle produite dans les gaz et dans les liquides est très-remarquable, et montre à quoi est dû le phénomène des raies brillantes; il provient probablement du transport à l'état d'incandescence des particules arrachées aux conducteurs : comme dans les liquides les raies disparaissent, ce transport paraît arrêté, et la lueur émise par l'étincelle n'est plus due qu'à l'incandescence du milieu interposé entre les conducteurs. Il serait peut-être possible que, pour une très-grande tension électrique et de très-fortes décharges, même dans les liquides, il pût y avoir des transports de matières, et par conséquent des raies brillantes des spectres; mais, dans les conditions de ces expériences, on n'en a pas observé.

Arc voltaïque dans les gaz et les liquides. La lumière électrique qui provient d'étincelles émanées de différentes sources possédant les mêmes propriétés, l'arc voltaïque doit présenter des effets analogues; cependant il offre des particularités que nous devons signaler.

Le spectre obtenu en réfractant la lumière de l'arc voltaïque formé dans l'air est sillonné de raies brillantes qui changent avec la nature des conducteurs, comme lorsqu'on étudie les spectres des étincelles. Quand on le produit à la même place et que l'on compare les raies obtenues entre les mêmes pôles métalliques, en faisant usage des étincelles puis des arcs, on trouve dans les spectres voltaïques des raies qui ont leurs analogues dans ceux des

étincelles, mais beaucoup d'entre elles manquent. M. Masson attribue le moindre nombre des raies brillantes du spectre de l'arc voltaïque à ce qu'il est produit par un faible excès de tension électrique, et qu'il se comporte comme étant formé d'une succession d'étincelles moins vives que les étincelles ordinaires.

La position des raies brillantes dans les spectres de la lumière de la pile est également indépendante de l'intensité du courant, car M. Despretz s'est assuré qu'en passant d'une pile de 100 éléments de Bunsen a une pile de 600, une raie jaune ou bleue amenée en coïncidence avec le fil d'une lunette servant aux observations restait parfaitement fixe.

La lumière provenant d'un courant voltaïque passant entre deux charbons dans l'eau ou l'alcool ne présente pas de raies brillantes ; ainsi, dans ce cas, on observe le même effet qu'avec l'étincelle électrique. Les charbons ne subissent aucune altération, et il n'y a pas transport du pôle + au pôle —; dans l'eau, il y a seulement formation d'oxyde de carbone. En substituant des conducteurs métalliques aux charbons, on observe alors dans le spectre des raies brillantes; le métal est réduit en vapeur qui obscurcit le liquide, et celui-ci laisse déposer une poussière noire qui n'est autre que du métal très-divisé. Ainsi, dans ce cas, l'apparition des raies dans le spectre produit par la lumière émanant du sein du liquide est dû au transport du métal qui a pu s'effectuer par suite de la haute élévation de température de l'arc.

Les résultats que nous venons de faire connaître donnent la cause de la lumière électrique, et indiquent quelle est la part afférente au milieu où elle se produit et aux conducteurs entre lesquels elle se manifeste. Il est évident, d'après l'étude de la composition de la lumière électrique, que l'incandescence des parties pondérables des conducteurs transportées par le courant peut augmenter l'intensité de la lumière, mais qu'elle n'en est pas la cause, puisqu'on peut obtenir des étincelles dans les liquides sans raies brillantes et sans transport de matière, les raies brillantes étant dues à l'ignition des particules arrachées aux conducteurs, et leur position étant indépendante du milieu gazeux où l'étincelle est produite. Dès lors, on peut dire que la lumière électrique est due à l'incandescence du milieu au sein duquel elle se produit, ce milieu pouvant être gazeux, liquide ou solide. Si l'on suppose que cette incandescence s'opère en vertu d'une conductibilité propre de ces matières, l'effet serait analogue au phénomène calorifique produit par le passage d'un

courant électrique dans un fil métallique; alors l'électricité, en se propageant à travers la matière pondérable, solide, liquide ou gazeuse, élèverait sa température, comme le fait un courant voltaïque traversant un fil de platine qu'il échauffe jusqu'à l'incandescence. Cette hypothèse a l'avantage de ramener à une même cause tous les phénomènes de chaleur et de lumière produits par l'électricité en mouvement.

Phosphorescence produite par la lumière électrique. La phosphorescence est la propriété que possèdent passagèrement la plupart des corps de devenir lumineux par l'action de la chaleur, de la lumière, du frottement, du choc, des affinités, etc., après que cette action a cessé. La durée, la couleur et l'intensité de la lumière émise par les corps dépendent de la nature des corps, de l'état des surfaces et de l'énergie avec laquelle agit la cause productrice. Il y a des substances, comme les sulfures de calcium, de barium, de strontium, certains diamants, la chaux fluatée, etc., qui deviennent assez vivement lumineuses par l'action de la chaleur et de la lumière; d'autres, comme le carbonate de chaux, de baryte, etc., qui manifestent ces effets à un moindre degré (*).

Parmi les causes qui excitent la phophorescence, on doit citer les étincelles électriques qui, par leur action énergique, la manifestent dans des corps où elle n'aurait pas été sensible sous l'influence de l'action solaire.

Pour soumettre les corps à l'action des décharges électriques, on les place sur la tablette de l'excitateur universel quand ils sont en fragments, et dans des tubes quand ils sont en poussière, en mettant les extrémités des conducteurs à une distance de 2 à 3 centimètres, et l'on fait passer de l'un à l'autre, à travers ces corps, la décharge d'une batterie électrique d'un certain nombre de bocaux. On se place dans l'obscurité, on ferme les yeux et on ne les ouvre que lorsque la décharge a éclaté, afin d'examiner les effets produits. En opérant avec un morceau de craie, on aperçoit immédiatement après, dans le trajet parcouru par l'électricité, une traînée de lumière diversement colorée, et dont la durée est quelquefois d'une minute et même plus. Sur d'autres corps, on remarque de semblables effets; seulement la couleur de la lumière varie considérablement à raison de leur nature, et selon qu'ils sont en poudre ou en petits fragments. Un fragment de cristal de

(*) Becquerel, *Traité de physique*, t. II, p. 129.

baryte sulfatée donne une lumière verte brillante; les coquilles d'huître calcinées donnent les couleurs prismatiques très-belles; les effets sont moindres quand elles sont réduites en poudre, et sont plus brillants et ont plus de durée quand elles ont été calcinées avec du soufre. Le spath fluor réduit en poudre grossière émet de la lumière verte; le cristal de roche donne une lumière rouge qui devient ensuite blanche.

Un grand nombre de substances émettent, par ce mode d'action, de la lumière après avoir été influencées par une décharge électrique très-intense, agissant à petite distance; nous citerons le papier, l'ivoire, etc., mais les métaux et les liquides paraissent ne pas éprouver d'action.

La décharge électrique possède encore la faculté de rendre aux corps la propriété phosphorique qu'ils ont perdue par la chaleur; nous citerons le spath fluor violet calciné fortement, qui cesse d'être phosphorescent après une exposition solaire, et qui le devient quand il a été soumis à la décharge; il en est de même de la chaux phosphatée.

La lumière électrique est capable également de faire acquérir la phosphorescence aux corps qui ne la possédaient pas avant, tels que les spaths fluors blancs, les diamants, etc.

Des morceaux de spath fluor qui avaient une teinte jaunâtre, après six ou sept décharges au contact, en prenaient çà et là une bleuâtre. La phosphorescence ainsi produite était d'autant plus forte que la teinte était plus visible (Pearseall).

Les fluors qui deviennent ainsi phosphorescents, conservent cette propriété quand on les soustrait à l'action de la lumière solaire, tandis qu'ils la perdent au bout de quelque temps à l'exposition de cette lumière.

La phosphorescence produite en un point par la lumière électrique semble se propager dans la matière sensible, comme l'indiquerait l'expérience suivante: si l'on recouvre une capsule de porcelaine contenant la matière impressionnable (sulfure de calcium) avec un papier opaque, percé d'un petit trou rond, d'environ 1 millimètre de diamètre, le papier, enlevé subitement après la décharge, laisse voir à la partie correspondante au trou un tout petit cercle lumineux, d'un éclat très-vif, le reste de la matière étant obscur; mais peu à peu ce reste s'éclaire aussi, et la phosphorescence finit par se propager en cercle sur toute la surface de la matière, puis l'effet s'affaiblit graduellement, et après quelques instants tout rentre dans l'obscurité.

L'étincelle électrique agit dans ces différentes conditions comme source de lumière. Il est facile de le démontrer en faisant éclater les étincelles ou les décharges à distance des sulfures de calcium ou de barium (phosphore de Canton et de Bologne), et même à plusieurs mètres pour ceux qui sont très-impressionnables ; les effets précédemment décrits se manifestent, quoiqu'à un degré moindre, lorsqu'ils sont plus près. Mais, comme sources lumineuses, les décharges électriques sont beaucoup plus puissantes même que la lumière du soleil, car elles rendent phosphorescents des corps qui ne manifestent pas cette propriété sous l'action solaire.

On sait que les rayons lumineux de toutes les réfrangibilités n'agissent pas avec la même énergie pour provoquer la phosphorescence dans les corps ; en général, les rayons les plus réfrangibles sont seuls doués de cette faculté, et même une portion du rayonnement plus réfrangible que les rayons violets. Pour la lumière électrique, il en est de même. On peut le démontrer en mettant sur la tablette de l'excitateur universel une capsule remplie de sulfure de calcium phosphorescent, et recouverte successivement des différents écrans dont on veut étudier les propriétés. Si l'on excite la décharge au-dessus de ces écrans, l'action de la lumière électrique ne pourra avoir lieu qu'après le passage de celle-ci au travers des écrans. On trouve de cette manière que le cristal de roche laisse passer facilement les rayons qui excitent la phosphorescence ; tandis que d'autres substances aussi transparentes pour la lumière, le verre, le papier glacé, les arrêtent en partie. Les verres violets et bleus permettent aux rayons qui jouissent de cette faculté de passer, quoiqu'à un moindre degré que le verre blanc, mais les verres rouges les arrêtent en totalité.

Nous citerons quelques nombres pour donner une idée des limites entre lesquelles les actions sont comprises. En prenant pour écran une lame de verre de $3^{mm},65$ d'épaisseur et un cristal de roche de $5^{mm},95$, on a reconnu que celle-ci laissait passer la plus grande partie des rayons actifs, tandis que la première les absorbait ; en opérant à une distance de 12 centimètres avec deux autres écrans formés, l'un d'une lame de cristal de roche enfumé de $21^{mm},76$, l'autre d'une lame de verre de $3^{mm},55$, la première laisse passer une forte proportion des rayons actifs, et l'autre aucun, quoique se laissant traverser par les rayons lumineux (Becquerel et Biot).

Ces exemples montrent que la portion de rayonnement qui ex-

cite la phosphorescence est en grande partie plus réfrangible que le violet, et que l'action inégale des écrans transparents indique que quelques-uns sont très-perméables aux rayons de cette réfrangibilité, tandis que d'autres, comme le verre, le sont moins. Quant aux rayons de réfrangibilité correspondant au rouge, à l'orangé, au jaune et au vert, bien loin d'exciter la phosphorescence, ils la détruisent (E. Becquerel) (*).

Les décharges électriques éclatant dans l'air à diverses pressions donnent lieu à des effets de phosphorescence qui sont également différents; ainsi en excitant des décharges de même intensité entre deux boules de cuivre placées au milieu d'un ballon et placées à quelques centimètres au-dessus de substances phosphorescentes, on trouve que lorsque la décharge a lieu dans l'air à une pression moindre ou plus grande que la pression atmosphérique, son rayonnement communique aux différentes substances une phosphorescence moindre ou plus grande que celle qui a lieu à la pression ordinaire. Ainsi, quoiqu'à l'œil les décharges paraissent à peu près aussi brillantes, cependant elles sont loin d'exercer la même action; or, comme on a vu précédemment, d'après les expériences de Davy et les autres que nous avons rapportées, que la même quantité d'électricité donne lieu à des intensités lumineuses différentes quand on fait varier la quantité des particules matérielles placées sur le trajet de la décharge, on se rend facilement compte des effets produits. Ainsi se trouvent confirmées par ce moyen les différences d'intensité lumineuse qu'une même décharge peut produire à travers un gaz soumis à diverses pressions (E. Becquerel).

On a compris sous la dénomination du phénomène de phosphorescence, des phénomènes très-différents, puisque quelques-uns d'entre eux sont dus probablement, ainsi qu'on l'a vu page 335, à une émission de lumière électrique. Quant aux effets produits sous l'influence de la lumière, l'hypothèse la plus probable que l'on ait faite jusqu'ici pour expliquer leur production consiste à supposer que les corps sont capables non-seulement de vibrer par l'influence d'ondulations lumineuses lorsque celles-ci les frappent, vibrations qui rendent les objets visibles sous l'action de la lumière, mais encore que certains d'entre eux (les corps phosphorescents) ont la faculté d'être impressionnés par des ondulations de longueur déterminée, et qu'une fois en vibration, ils continuent à conserver cet état pen-

(*) *Annales de physique et de chimie*, 3e série, t. IX, p. 257 et XII, p. 244.

dant un certain temps après que l'action a cessé. Dans certains cas, les effets de phosphorescence par élévation de température et d'autres encore paraissent dus à une action analogue (E. Becquerel).

CHAPITRE V.

Effets physiologiques.

Action de l'électricité sur les végétaux. L'emploi des forces physiques dans l'étude des phénomènes physiologiques est une question de l'ordre le plus élevé, attendu que les recherches qu'il exige ne tendent rien moins qu'à nous initier sur le rôle que jouent les forces physiques dans les fonctions des organes chargés d'entretenir la vie.

L'électricité, à raison de son universalité d'action, a été considérée par quelques personnes comme l'agent principal de la nature. Certes, si l'on s'en tenait seulement à la rapidité de son action, quand elle agit comme force physique ou comme force chimique, ainsi qu'aux effets calorifiques, lumineux, magnétiques et autres qu'elle produit, on serait assez disposé à reconnaître en elle cette force rapide comme la pensée en vertu de laquelle le cerveau fonctionne. Mais, si on se bornait à cette induction, on commettrait une grave erreur, attendu que, bien que l'électricité produise quelques effets qui sont les attributs de la vie, comme nous le verrons, rien ne prouve jusqu'ici que les forces vitales sous l'empire de la volonté, ou non soumises à cette volonté, aient réellement une origine électrique.

Ce que nous avons de mieux à faire n'est donc pas de chercher si l'électricité est capable d'organiser la matière, car nos tentatives à cet égard seraient infructueuses, mais d'étudier, 1° les modification qu'éprouvent les tiges, les membranes, les organes, quand les forces électriques agissent comme forces chimiques pour favoriser ou contrarier l'action des forces vitales, ou comme force physique, pour exciter ces mêmes parties, en produisant des contrac-

tions ou une accélération dans la circulation des liquides; 2° les effets électriques qui peuvent se produire dans les actions vitales: c'est la marche la plus rationnelle que l'on puisse adopter pour établir des rapports entre les forces électriques et les forces vitales, la nature de ces dernières nous étant inconnue.

Nous commencerons par exposer des effets de l'électricité sur la végétation, et sur les phénomènes physiologiques des plantes, attendu d'une part, que leur organisation est plus simple que celle des animaux, et, de l'autre, que la volonté n'est plus là pour maîtriser son action.

Van Marum, ayant montré que l'irritabilité des fibres musculaires était détruite au moment où l'on faisait passer par ces fibres une décharge électrique d'une force suffisante, a fait des expériences semblables pour détruire l'irritabilité des plantes, et voir jusqu'à quel point l'ascension et le mouvement de la séve étaient dus à cette irritabilité. Diverses espèces d'*euphorbia* ont été soumises, à cet effet, à l'expérience, lesquelles ont la propriété de donner une grande quantité de séve laiteuse, quand on leur fait une plaie. Des décharges provenant de la grande machine teylerienne ont été transmises, pendant vingt ou trente secondes, à travers des branches d'*euphorbia lathyris*, et des tiges de l'*euphorbia campestris* et de l'*euphorbia cyparissias*. Toutes les branches et tiges qui avaient servi à transmettre la décharge ne laissèrent plus écouler de séve, quand elles furent coupées. D'autres plantes, soumises au même mode d'expérimentation, présentèrent les mêmes effets. Or, quand on pressait ces tiges électrisées entre les doigts, il en sortait une petite quantité de séve; il est prouvé par là que la décharge avait fait perdre aux vaisseaux la faculté de se contracter pour chasser la séve en dehors.

Des expériences ont été faites également avec production de semblables effets sur une seule branche, et cela en employant, non pas la grande machine électrique, mais celle dont le plateau était de 31 pouces. Les plantes exigeaient plus ou moins de temps pour perdre la faculté en question, suivant l'espèce à laquelle elles appartenaient.

L'expérience fut répétée sur l'*euphorbia lathyris* avec une batterie de 15 pouces carrés de surface garnie, mais non chargée suffisamment pour déchirer les tissus. Cette décharge a toujours suffi pour faire cesser la contraction des vaisseaux.

D'autres plantes, telles que la *mimosa sensitiva* et la *mimosa pu-*

dica, sont excitables sous l'influence de l'électricité à faible tension, sans qu'il en résulte pour cela un désordre apparent dans l'organisme. Le courant qui passe par les branches et les feuilles produit des contractions lentes, successives, séparées par de grands intervalles; effets différents de ceux que présentent les animaux, comme nous aurons l'occasion de le faire remarquer plus loin.

L'électricité exerce encore une influence remarquable sur la circulation de la séve dans le chara, comme le prouvent les expériences suivantes que l'un de nous (Becquerel) a faites avec M. Dutrochet.

Nous rappellerons d'abord comment la température intervient dans la circulation du chara. A zéro, la circulation est très-lente; elle s'accélère à mesure que la température monte, et elle devient rapide vers 18°; elle diminue ensuite jusqu'à 27°, où elle est très-faible; puis la vitesse augmente peu à peu, et deux heures après elle redevient très-grande; au delà de 27°, en chauffant, on observe des effets semblables; à 45°, le mouvement rotatoire s'arrête pour ne plus reparaître.

L'électricité produit des effets qui ont de l'analogie avec les précédents, mais qui en diffèrent cependant sous certains rapports. Ces expériences ont été faites avec un microscope d'un grossissement moyen; la tige du chara a été dépouillée de son écorce, placée sur une tige de verre légèrement concave avec une petite quantité d'eau, et ses deux extrémités ont été recouvertes de feuilles très-minces de platine, destinées à transmettre le courant. Voici les effets que l'on a observés :

1° L'électricité qui traverse la tige du chara tend à produire dans les premiers instants un engourdissement dont l'intensité dépend de celle du courant.

2° Le courant agit en même temps et également sur le mouvement ascendant et le mouvement descendant.

3° Le sens du courant ne paraît établir aucune différence dans leur mode d'action.

4° Si le courant provient d'une pile chargée avec de l'eau seulement, il faut employer un certain nombre de couples pour arrêter le mouvement de la lymphe. Quelques instants après, il recommence peu à peu sous l'influence du courant, et finit par acquérir la vitesse qu'il avait primitivement. En augmentant le nombre de couples, il y a un nouvel arrêt, et ainsi de suite jusqu'à ce que le courant ait assez d'intensité pour arrêter le mouvement de rotation pendant

quelques heures. En rétrogradant, c'est-à-dire en diminuant successivement le nombre des couples, on remarque encore des arrêts et des reprises de mouvement. En opérant avec une pile plus fortement chargée, on observe des effets semblables. Le passage de l'électricité ne produit aucune désorganisation, puisqu'un temps plus ou moins long rend à la plante ses facultés naturelles.

Ce qui se passe dans le chara serait produit probablement dans tous les corps organisés où l'on observe des liquides en circulation ou des mouvements fibrillaires, comme la membrane muqueuse du manteau d'une huître en offrent un exemple.

Influence de l'électricité sur la germination. Davy a avancé que le blé germait plus vite dans l'eau pure électrisée positivement que dans celle qui l'est négativement : cet effet était dû à ce que la graine étant, dans le premier cas, entourée d'une atmosphère d'oxygène, se trouvait dans les conditions voulues pour que la germination s'effectuât convenablement. Quand l'eau n'est pas parfaitement pure ou que l'action se prolonge, il se dépose au pôle positif des acides qui réagissent sur les graines et altèrent peu à peu l'embryon jusqu'au point de l'atrophier et même quelquefois de le détruire complétement. Il n'en est pas de même au pôle négatif, du moins dans certaines limites.

Voici les effets que l'un de nous a observés, en opérant avec deux capsules d'or ou de platine en communication avec une pile à auge de 30 éléments faiblement chargée, et séparées par une capsule de porcelaine, contenant, comme les deux premières, de l'eau de Seine et du coton cardé sur lequel on avait semé des graines de cresson alénois; les trois capsules communiquaient ensemble au moyen de mèches de coton : dans la capsule négative, la germination et la végétation se sont montrées dans les premiers temps sensiblement comme dans la capsule de porcelaine, tandis que de l'autre côté la germination a été lente, et la végétation subséquente en partie atrophiée. L'eau de la capsule positive a donné la réaction de l'acide sulfurique; celle de la capsule négative, la réaction de la chaux. En interrompant la communication avec la pile, le développement de la jeune plante continua à s'effectuer dans la capsule négative, tandis que dans l'autre la végétation était lente et comme suspendue; l'acide devenu libre altérait visiblement la plante (Becquerel).

Si Davy eût continué pendant assez longtemps ses expériences, il aurait obtenu au pôle positif des effets semblables dus à la réaction

sur la graine et le jeune végétal des produits de la décomposition électro-chimique de l'eau et des substances qu'elle avait prises à l'air ou aux vases qui la renfermaient et même à la graine. Le pôle négatif n'agit pas d'une manière aussi fâcheuse, bien au contraire, attendu que les alcalis à petite dose sont favorables à la végétation. On peut en avoir la preuve en expérimentant comme on va le voir avec de l'électricité à faible tension.

On place dans deux soucoupes de porcelaines deux couples voltaïques, formés chacun de deux lames de cuivre et de zinc soudées ensemble par une de leurs faces; dans l'une, le zinc est en dessus, dans l'autre le cuivre. On met sur les faces à découvert du coton et des graines de cresson alénois, et dans les soucoupes de l'eau en quantité suffisante pour humecter le tout. On dispose de même une lame de verre dans une autre capsule, afin d'avoir un point de comparaison; voici les résultats d'une expérience : Deux ou trois jours après, à la température ordinaire de l'atmosphère, les radicules parurent en même temps dans les trois capsules; mais la végétation ne continua pas également dans chacune d'elles : elle fut plus forte sur la face cuivre que sur le verre, tandis que sur la face zinc les radicules fuirent la surface métallique, se contournèrent, se desséchèrent peu à peu, et les tiges cessèrent de croître. Avec les pois ordinaires (*pisum sativum*), on observa des effets semblables : La face négative donna la réaction alcaline avec le papier à réactif, tandis que sur l'autre on constata la présence d'un sel de zinc qui nuisit à la végétation, et finit même par la détruire. Avec de l'eau renfermant une petite quantité d'un sel à base terreuse ou alcaline, les effets furent encore plus marqués (Becquerel).

On voit par là que, sous l'influence de forces électriques faibles, l'action du pôle négatif, à raison probablement des produits alcalins secondaires qui s'y trouvent déposés, active les phénomènes de la végétation, tandis que celle du pôle positif la diminue, jusqu'au point de la faire cesser. Quoiqu'on ne puisse définir nettement l'action de chaque pôle sur la végétation, on est porté à croire cependant, dans les conditions où l'on a opéré, que l'intervention des substances provenant de la décomposition électro-chimique des composés en dissolution dans l'eau ou se trouvant dans les graines a joué le rôle principal dans les effets produits.

Il est à remarquer toutefois que dans la germination, les éléments de la graine, éprouvant sans cesse des changements, se trouvent peut-être dans des états électriques dépendant du rôle que chacun

d'eux joue dans les réactions; ils obéissent par conséquent bien mieux à l'action du courant que si cet état n'existait pas. Quelles que soient les causes agissantes, il paraît prouvé que l'on peut employer avec avantage dans la germination, et même dans les autres actes de la végétation, l'action électro-chimique d'un seul couple, en plaçant les graines et les jeunes plantes au côté négatif, où se trouvent les éléments qui favorisent la végétation. Les bulbes de jacinthe ou d'autres espèces éprouvent des effets analogues.

En dehors des effets électro-chimiques, on ne peut dire encore si l'électricité intervient d'une manière quelconque dans les phénomènes de la vie végétale. M. de Candolle a fait à ce sujet les réflexions suivantes, dans sa *Physiologie végétale*, qui sont pleines de justesse : « Ceux qui ont cherché à établir que le fluide électrique était « l'agent de la vie, soit dans les animaux, soit dans les plantes, « me paraissent encore loin d'avoir ébranlé l'idée générale du prin« cipe vital. D'un autre côté, la plupart se fondent sur des données « vagues et générales, qui sont presque entièrement dénuées de « preuves, comme on peut s'en convaincre dans leurs ouvrages. De « l'autre, en supposant que le fluide électrique ait une action appré« ciable, qu'est-ce qui la met en jeu? Pourquoi agit-il dans les « êtres vivants et cesse-t-il d'agir dans les êtres morts? » Nous répondrons à cette dernière question que la cause qui met en jeu cette action, si elle existe, est sans doute le principe vital qui, en opérant des réactions chimiques, doit produire de l'électricité, laquelle peut intervenir dans les phénomènes de la végétation.

De l'action physiologique de l'électricité dans les animaux. Les phénomènes physiologiques de l'électricité peuvent être divisés en trois parties : la première comprend les effets généraux produits par le passage de l'électricité à forte tension dans les animaux; la seconde, les effets si variés des contractions; la troisième, les effets chimiques résultant du passage de l'électricité : examinons successivement chacune de ces trois classes de phénomènes.

On avait annoncé que l'électricité accélérait les pulsations du pouls, et par conséquent la circulation du sang, mais Van Marum, qui a fait à ce sujet une série d'expériences avec la grande machine du musée de Teyler, a obtenu constamment des résultats négatifs. On s'est appuyé encore pour le prouver sur les effets produits par l'électricité pendant l'écoulement des liquides dans les vaisseaux capillaires; la comparaison toutefois n'était pas exacte, comme l'expérience l'a démontré. On a placé sur un isoloir une personne

électrisée à laquelle on a ouvert la veine. Dès l'instant que le patient touchait le sol, le jet perdait de sa vitesse et de son amplitude. Cet effet n'avait lieu que parce qu'il y avait une ouverture et que l'électricité exerçait une action répulsive sur les particules du liquide; sans cela, toute l'électricité se serait portée à la surface du membre, et l'action répulsive de l'électricité ne se serait plus manifestée.

L'action répulsive est telle, dans certains cas, qu'elle peut vaincre quelquefois la force d'agrégation. MM. Prévost et Dumas, en faisant passer une étincelle à travers une petite goutte de sang, ont observé que celle-ci prenait un aspect framboisé, annonçant la séparation partielle des globules élémentaires.

Van Marum, qui a fait des expériences sur des animaux avec une très-forte batterie électrique, a reconnu que, frappés par l'électricité, ils ne perdaient pas toujours la vie au moment de la décharge, comme cela a lieu avec la foudre. En opérant sur des serpents, des vipères, etc., doués d'une excitabilité difficile à détruire, des effets contraires furent obtenus. En faisant passer la décharge dans toute la longueur du corps d'anguilles de 5 décimètres de longueur, celles-ci furent tuées sur-le-champ, et aucun des excitants ordinaires ne put indiquer aucune trace d'irritabilité. En analysant les effets produits, il reconnut que le système nerveux était particulièrement affecté et même détruit par le passage d'une forte décharge. Ce système étant frappé de mort immédiate, la circulation doit être suspendue aussitôt que le cœur et les artères ont perdu leur irritabilité.

Voilà bien ce qui se passe en opérant avec de l'électricité à forte tension; mais, en n'employant que de très-faibles décharges, il se produit des phénomènes de contraction qui rappellent les attributs de la vie.

C'est en 1790 que le hasard, mais un de ces hasards heureux dont un homme de génie sait seul tirer parti, conduisit Galvani, professeur d'anatomie à Bologne, à la découverte d'un principe général dont les applications sont immenses pour la philosophie naturelle. Laissons parler Galvani (*) : « Je disséquai une grenouille et « la préparai comme l'indique la figure (nous le dirons ci-après), « et, me proposant d'en faire toute autre chose, je la plaçai sur une

(*) *De Bononiensi scientiarum et artium instituto, atque academiæ commentarii* (t. VII); *de viribus electricitatis in motu musculari commentarius.*

« petite table où se trouvait une machine électrique; elle n'était « séparée du conducteur que par un petit intervalle. Une des per- « sonnes qui m'aidaient ayant approché légèrement par hasard la « pointe d'un scapel des nerfs cruraux de cette grenouille, aussitôt « tous les muscles se contractèrent de telle sorte qu'on aurait dit « qu'ils étaient agités par les plus fortes convulsions. Une autre « personne qui faisait avec nous des expériences sur l'électricité « remarqua que ce phénomène avait lieu seulement lorsqu'on tirait « des étincelles du conducteur de la machine. Tandis que j'étais « occupé d'autre chose et que je réfléchissais en moi-même, cette « personne, étonnée de ce fait, vint aussitôt m'avertir. Pour cela, « je suis d'un zèle incroyable; et brûlant du désir de répéter l'ex- « périence, je voulus mettre au jour la cause inconnue de ce phé- « nomène. En conséquence, je touchai moi-même, avec la pointe « du scalpel, l'un et l'autre des nerfs cruraux, tandis qu'un de « ceux qui étaient présents tirait une étincelle. Le phénomène se « présenta de la même manière; je vis de fortes contractions « dans les muscles des membres, comme si l'animal avait été pris « du tétanos, et cela au moment même où l'on tirait des étin- « celles. » Le fait signalé par Galvani, dans sa relation, n'était en réalité qu'un effet de choc en retour, en vertu duquel le nerf, étant irrité par l'électricité, faisait contracter le muscle. L'électricité agis- sait donc dans cette circonstance commme le frottement, la cha- leur, les acides, etc.

Telle est la relation de la découverte du fait fondamental qui a servi de point de départ aux travaux de Galvani et de Volta, et dont l'influence a été immense sur les progrès de l'électricité.

Galvani préparait, comme il suit, la grenouille, animal qui est employé avec le plus d'avantage à l'étude des contractions, à cause de son extrême irritabilité : on coupe la colonne dorsale un peu au- dessous des pattes de devant; on conserve la partie antérieure dont on enlève la peau en la retournant; puis on détache les chairs qui entourent la colonne, afin que les cuisses, entièrement dénudées, ne tiennent à la colonne que par les nerfs lombaires. La grenouille ainsi préparée est apte à faire des expériences.

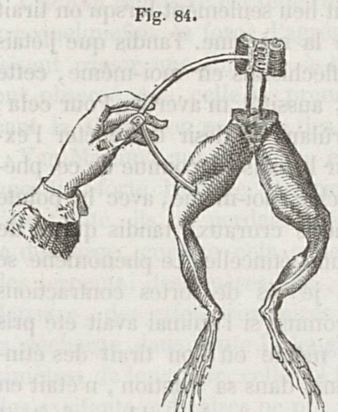
Duverney (*) avait fait voir sur une grenouille fraîchement morte qu'en prenant dans le ventre de l'animal les nerfs qui vont aux cuisses et aux jambes, et les irritant un peu avec le scalpel, ces

(*) *Histoire de l'Académie des sciences* pour 1700.

parties frémissaient et éprouvaient une espèce de convulsion. Si la grenouille était morte depuis longtemps, rien de semblable n'arrivait. Cette observation de Duverney est tout à fait distincte de celle de Galvani; elle prouve seulement que dans une grenouille nouvelle morte, en irritant un nerf par le frottement, on fait contracter le muscle correspondant.

La découverte la plus importante de Galvani est celle qui est relative à l'influence des métaux différents dont il armait les muscles et les nerfs, pour faire contracter les premiers, en mettant en contact ces armures, effet que l'on obtient aussi en touchant les muscles et les nerfs avec un arc composé de deux métaux différents. Cette découverte a servi de point de départ à Volta pour créer la pile; il prouva qu'à l'instant du contact des armures il y avait dégagement d'électricité.

Fig. 84.



Une lutte s'établit alors entre Galvani, qui ne voyait dans l'arc métallique qu'un moyen de transmission du fluide nerveux, et Volta, qui soutenait que l'effet produit était dû au dégagement d'électricité qui a lieu au contact de deux métaux différents. On crut un instant Galvani vainqueur quand il prouva, aidé de son neveu Aldini, que l'arc métallique n'était pas nécessaire pour exciter les contractions, puisqu'on les observait encore dans une grenouille nouvellement écorchée, en mettant en contact les muscles cruraux avec les nerfs lombaires, expérience dont nous avons déjà parlé page 269, en traitant du courant propre de la grenouille. Volta répondit que ce fait n'était qu'une généralisation de son principe, d'après lequel deux corps suffisamment bons conducteurs se constituent toujours par leur contact mutuel dans deux états électriques différents. Cette explication ne s'accorde nullement avec tout ce que nous avons dit du courant propre. Mais reprenons les contractions en suivant une marche didactique.

Le muscle et le nerf étant armés d'une feuille de platine, si l'on fait passer de l'un à l'autre, soit la décharge d'une bouteille de Leyde faiblement chargée, soit un courant électrique provenant d'un seul couple, les muscles sont aussitôt violemment contractés.

En prenant pour armatures deux lames de métal différent, mais dont l'un est oxydable et l'autre ne l'est pas, et en les mettant en contact, il y a aussitôt contraction. On peut faire contracter également les muscles de la vie organique, tels que le cœur, etc. Les effets n'ont lieu qu'à l'instant où l'on ferme ou bien quand on ouvre le circuit; ils se manifestent également sur des muscles séparés du tronc à cause des filets nerveux qui les traversent. Rappelons toutefois que la contraction ne se manifeste ordinairement dans un muscle que lorsque le nerf qui s'y ramifie est irrité d'une manière quelconque par le pincement, un acide, un fer rouge, etc.; l'électricité se comporte donc dans cette circonstance comme un simple excitant.

Diverses causes modifient l'action de l'électricité sur les nerfs, pour faire contracter le muscle correspondant, entre autres; la ligature. Lorsqu'on fait une ligature à un nerf et qu'on l'irrite au-dessus, les muscles inférieurs ne se contractent pas et l'animal éprouve de la douleur ; au-dessous, les effets sont inverses.

Le phénomène des contractions ne paraît nullement modifié par les poisons, tels que l'acide cyanhydrique et la morphine.

Les contractions cessant aussitôt que le courant est établi invariablement entre le nerf et le muscle, on doit en conclure que le passage de l'électricité y produit une modification instantanée, qui subsiste tant que circule le courant. Or, comme il y a contraction, en général, en interrompant le circuit, cet effet indique soit une action inverse, due au courant d'induction dirigé en sens contraire (courant qui sera étudié dans le troisième volume), soit au retour des molécules organiques à leur position naturelle d'équilibre.

Alternatives voltaïques. Lorsque le courant provenant d'un certain nombre de couples a circulé pendant quelque temps dans un nerf, l'animal ne se contracte plus, en ouvrant ou en fermant le circuit; mais si l'on change la direction du courant, les contractions se manifestent de nouveau. En intervertissant un certain nombre de fois le sens du courant, on peut annuler ou rappeler à volonté l'excitabilité des muscles de la grenouille. Quand le muscle de la grenouille a perdu la contractibilité par suite du passage dans le nerf correspondant d'un courant d'une intensité donnée, pendant un certain temps, il possède encore la faculté de se contracter sous l'influence d'un courant plus énergique. C'est en cela que consiste le phénomène des alternatives voltaïques. Ces expériences prouvent bien que le courant, en traversant les muscles et les nerfs, n'y produit pas une désorganisation, mais bien un dérangement momen-

tané dans la disposition des molécules organiques, ou un affaiblissement dans l'action vitale.

Les muscles d'une grenouille qui ont perdu leur faculté contractile par le passage d'un courant, la recouvrent par le repos : néanmoins l'irritabilité se trouve affaiblie. Dans l'animal vivant, de semblables effets sont produits, seulement les forces vitales réparent promptement les atteintes portées par le courant aux organes du mouvement. Ce pouvoir réparateur ne s'éteint pas avec la vie, puisqu'il subsiste encore pendant un certain temps après, durant la lutte entre les forces de la nature organique et les forces physiques.

Nous avons avancé précédemment que la contraction produite à l'instant où l'on interrompt le circuit est due à l'action d'un courant d'induction dirigé en sens inverse du premier; on le prouve comme il suit : on place le tronc d'une grenouille dans une tasse remplie d'eau, en relation avec le pôle positif d'une pile, et les deux autres cuisses dans une autre tasse en communication avec le pôle négatif. En fermant le circuit, les contractions se manifestent; en le rompant, elles sont peu sensibles ou nulles. En dirigeant le courant en sens inverse, les effets sont contraires. Concluons de là que les contractions qui se manifestent quand on interrompt le circuit proviennent bien d'un courant d'induction dirigé en sens inverse du courant primitif.

Dans les alternatives, le passage du courant produit dans les nerfs une nouvelle condition qui les rend moins sensibles à l'action du courant; on sait, d'un autre côté que, sans employer les alternatives, l'animal cesse de se contracter un certain temps après la mort. On a cherché quelle était la loi de cet affaiblissement. Valli avait remarqué qu'en soumettant les diverses parties d'un nerf à l'action d'un courant, la partie qui devient d'abord insensible est celle qui est la plus rapprochée du cerveau. M. Matteucci a repris cette question, qu'il a étudiée comme il suit : on découvre le nerf crural et le nerf sciatique d'une grenouille, et on touche ce dernier avec les extrémités d'un couple zinc et platine, placé sous les nerfs et disposé de manière qu'il chemine directement. Quel que soit le point touché, on obtient toujours des contractions dans le premier moment; quelques minutes après, si l'on touche le nerf près de son insertion dans la moelle épinière, les contractions sont à peine sensibles et cessent peu à peu; tandis que si l'on touche le nerf à côté de son insertion dans la jambe, on a des contractions très-fortes. Si

l'on attend encore, pour les produire, il faut découvrir et toucher une portion du nerf plus éloignée encore de la moelle épinière. En général, la portion du nerf qui, à l'introduction du courant inverse, excite des sensations douloureuses, s'approche d'autant plus de l'origine du nerf, que l'animal s'affaiblit, tandis que le contraire a lieu pour les contractions.

Lorsqu'on prépare une grenouille, il arrive quelquefois que les membres prennent l'éclat tétanique, surtout quand cette opération se fait rapidement et que l'animal est vigoureux ; il arrive aussi que les muscles se trouvent dans un état de relâchement et de souplesse absolue. Néanmoins, dans l'un et l'autre cas, les grenouilles se contractent sous l'influence d'un courant : dans le premier cas, ce sont de simples mouvements, tandis que dans l'autre ce sont de véritables contractions. On donne le tétanos à une grenouille préparée, en interrompant et rétablissant le circuit assez rapidement pour que la contraction, provenant d'un seul contact, subsiste encore avant la production de celle qui provient du contact suivant : l'effet ne peut être attribué qu'au changement d'état du nerf, qui passe rapidement de l'état naturel à un état forcé et réciproquement. Le tétanos naturel ne proviendrait-il pas de modifications semblables qu'éprouverait le système nerveux à la suite de vives douleurs ou de diverses causes morbides ?

Le courant, suivant sa direction, en traversant les muscles et les nerfs, produit, soit des effets de contraction, soit des effets qui affectent douloureusement l'animal. Ces effets ont été analysés avec beaucoup de soin par M. Marianini, et plusieurs autres physiciens. On a constaté qu'il y a sensation de douleur toutes les fois que le courant traverse les nerfs dans une direction opposée à leurs ramifications, c'est-à-dire allant des extrémités à la tête, tandis qu'il y a contraction quand le courant suit une direction opposée.

Mouvement et sensibilité. L'électricité est employée utilement pour distinguer les nerfs du mouvement des nerfs du sentiment, dont l'existence a été signalée par Charles Lebel. Voici en quoi consiste le fait principal : si l'on fait passer transversalement un courant dans l'épaisseur d'un cordon nerveux venant d'être séparé de l'axe cérébro-spinal, les muscles ne se contractent qu'autant que ce cordon a pour fonction de présider au mouvement ; il y a, au contraire, absence de contraction, s'il préside à la sensibilité. Il est nécessaire, pour mettre ce double effet en évidence, que le courant ne soit pas trop intense ; car autrement, en opérant sur les racines

postérieures, le courant passerait dans les racines antérieures. On voit comment, au moyen de l'électricité, il est possible de distinguer les filets nerveux du mouvement, des filets sensitifs qui s'anastomosent entre eux.

M. Longet a étudié avec beaucoup de sagacité l'emploi de l'électricité pour établir cette distinction. Muller, dès 1831, avait prouvé que l'excitation des racines postérieures des nerfs spinaux, au moyen de courants transversaux dans la grenouille, ne produisait jamais que de la douleur, et celle des racines antérieures, des contractions. M. Longet a démontré nettement, chez d'autres animaux, sur le chien par exemple, les propriétés différentes des racines spinales dans les nerfs crâniens et encéphaliques.

Le courant produit des sensations dépendantes de la nature de l'organe affecté. Il fait naître dans l'oreille la sensation du son. Volta, ayant fait passer d'une oreille à l'autre la décharge de 40 couples, éprouva un ébranlement tel dans le cerveau, qu'il entendait un sifflement semblable à celui d'une matière visqueuse en ébullition. Ritter entendait, au moment de la fermeture du circuit, un son correspondant au sol. Quand il n'avait qu'une seule oreille dans le circuit, l'un des pôles lui faisait entendre un son plus grave, et l'autre un son plus aigu. On peut déterminer l'apparence lumineuse en armant les deux surfaces de la langue, l'une d'une lame de zinc, l'autre d'une lame de cuivre, et mettant les deux lames en contact; on peut la produire également en appliquant une armature à chacun des yeux; ou l'une dans les fosses nasales et l'autre à l'un des yeux, ou bien encore, l'une à la langue, et l'autre aux gencives supérieures.

Indépendamment de l'effet physiologique produit sur les papilles nerveuses, sur les organes du goût et en général sur les nerfs par le courant agissant comme force physique, il faut encore y joindre celui qui provient de la réaction des substances acides et alcalines résultant de la décomposition électro-chimique. Il en est de même des effets qui ont lieu sur une plaie ou un muscle mis à nu, quand on y applique deux lames de platine en relation avec un appareil voltaïque.

Contractions des muscles après mort violente. Lors des grandes découvertes de Galvani et de Volta, on multiplia les expériences dans le but de démontrer qu'au moyen de l'électricité on pouvait reproduire les mouvements et les contractions dus à l'acte de la volonté. Galvani expérimenta sur une tête de bœuf récemment tué, avec une pile à colonne composée de zinc et d'argent et chargée

avec de l'eau salée. Une des oreilles fut mise en communication avec l'un des pôles, et l'autre avec le nazeau; aussitôt les yeux s'ouvrirent, les oreilles se dressèrent, la langue s'agita et les nazeaux s'enflèrent.

Aldini montra ensuite que, pour obtenir les plus fortes contractions, il fallait établir l'arc des oreilles à la moelle épinière; dans ce cas, les paupières s'ouvraient, le globe de l'œil roulait sur lui-même, comme dans la plus violente fureur. Le docteur André Ure opéra sur le corps d'un pendu, immédiatement après l'exécution, avec une pile de 270 plaques, chargée avec de l'eau acidulée et un mélange d'acide sulfurique et d'acide nitrique; un des pôles ayant été mis en communication avec la moelle épinière, l'autre avec le nerf sciatique, à l'instant même tous les muscles du corps se contractèrent par des mouvements convulsifs. En faisant mouvoir un des conducteurs de la hanche au talon, le genou plié, la jambe fut lancée avec tant de violence qu'elle faillit renverser une personne qui avait essayé de prévenir l'extension. Le docteur Ure parvint à imiter, jusqu'à un certain point, le jeu des poumons; en faisant passer le courant de la moelle épinière au nerf ulnaire, on vit aussitôt les doigts se mouvoir avec agilité. En faisant passer la décharge d'une oreille à l'autre et les humectant d'eau salée, les muscles du visage éprouvèrent d'horribles contractions; l'action des paupières fut très-marquée. Ces mouvements étaient désordonnés et ne représentaient qu'imparfaitement ceux qui ont lieu sous l'empire de la vie.

Les expériences d'Aldini n'ont rien présenté sur l'homme après la mort naturelle, par la raison qu'arrivant lentement, les fonctions vitales s'étaient anéanties peu à peu.

De l'emploi de l'électricité dans la thérapeutique. L'emploi de l'électricité comme moyen thérapeutique n'a pas répondu jusqu'ici à l'espérance des premiers expérimentateurs, qui avaient cru pouvoir en tirer un parti avantageux pour guérir certaines maladies ou en arrêter les progrès. Cependant il est permis de croire, d'après le mode d'action de l'électricité sur les parties constituantes des corps organisés, soit qu'elle agisse comme force physique ou bien comme force chimique, que cet agent doit exercer dans certaines circonstances une influence salutaire sur l'économie animale; on ne peut nier en effet que, dans certains cas, il n'y ait eu des résultats avantageux obtenus, surtout lorsqu'il s'agit de stimuler un organe qui ne fonctionne pas normalement.

L'électricité agissant comme force physique dans l'organisme produit des contractions ou un dérangement quelconque momentané dans l'équilibre des molécules organiques.

Quand on fait passer un courant des nerfs dans les muscles, ces derniers ne se contractent qu'en fermant et en ouvrant le circuit, et aucun effet apparent n'est produit tant que le courant circule. Si le circuit reste fermé pendant quelque temps, le repos seul ou l'action d'un courant dirigé en sens inverse peut leur rendre leur propriété contractile. Ce fait indique que le passage continu du courant dans les nerfs peut être employé utilement dans certaines maladies nerveuses résultant d'un état de surexcitation, attendu que les nerfs qui ont été parcourus par un courant pendant un certain temps, perdent momentanément la faculté de faire contracter les muscles correspondants, sous l'influence d'un courant de même intensité que le premier.

On a peu administré jusqu'ici l'électricité sous ce point de vue; on s'en tient, pour tous les cas morbides, aux courants interrompus, dont l'effet est de surexciter continuellement les nerfs. Ce traitement ne saurait convenir dans les cas où le système nerveux est dans un état permanent ou passager de surexcitation. Quand il s'agit de calmer un nerf surexcité, il faut employer les courants continus; si, au contraire, il se trouve dans un état d'atonie, on doit se servir de courants interrompus.

Pour appliquer les courants continus, il faut, suivant les cas, enlever l'épiderme de la peau, ou agir sur l'enveloppe cutanée intacte mais humide, et poser sur les parties des éponges imbibées d'eau salée ou des lames de platine en relation avec une pile et recouvertes d'une étoffe suffisamment épaisse de laine ou de coton pour conserver longtemps de l'humidité. Quand il s'agit d'atteindre des nerfs et d'agir directement sur eux, on se sert, pour transmettre le courant, non-seulement d'éponges appliquées sur la peau, mais aussi d'aiguilles de platine très-fines, introduites le plus près possible de ces nerfs et même dans leur trajet, si l'on n'a point à craindre d'effets fâcheux. On doit toujours avoir l'attention de commencer par de faibles courants, afin de ne pas effrayer le malade, et de tâter en quelque sorte l'organe, pour éviter des accidents. Lorsque l'on opère ainsi en introduisant des aiguilles métalliques dans les muscles, le passage continu du courant détermine dans les liquides de l'organisme des décompositions chimiques qui amènent autour des pointes de platine des substances acides et

alcalines, dont la réaction, sur les parties environnantes, produit souvent une inflammation plus ou moins forte, suivie d'une escarre.

Les courants interrompus, qui agissent comme surexcitants, peuvent être administrés, soit avec des machines électriques ordinaires, soit avec la pile, soit avec des machines d'induction. Avec les machines électriques, on tire des étincelles de diverses parties du corps au moyen d'excitateurs à manches isolants, dont on varie la forme suivant les effets que l'on veut produire. Quelquefois ces excitateurs ne sont que de simples brosses métalliques destinées à diviser à l'infini l'étincelle, afin de provoquer une certaine irritation sur la peau. Si l'on veut avoir des effets d'une certaine énergie, on emploie la bouteille de Leyde.

Actuellement on fait presque exclusivement usage d'appareils d'induction, donnant des courants intermittents dirigés dans le même sens, ou successivement en sens inverse. Les appareils que nous aurons occasion de décrire dans le troisième volume de cet ouvrage sont de différents genres, mais fournissent en général des courants induits par suite d'une succession d'aimantations et de désaimantations provoquées dans des fers doux, soit par un courant électrique, soit par le mouvement d'armatures en fer doux ou d'aimants. La différence des effets observés, c'est-à-dire les plus ou moins fortes contractions que l'on éprouve, et les douleurs plus ou moins vives que l'on ressent, tiennent, non pas tant à l'intensité du courant électrique mis en jeu qu'à l'instantanéité de son action et à la succession des intermittences que l'on peut produire. Nous indiquerons ces différents effets en parlant de l'induction, et en montrant les phénomènes physiologiques auxquels elle donne lieu.

Les paralysies sont des maladies dans lesquelles on a cherché à appliquer l'électricité. Dans quelques cas le traitement électrique a été appliqué avantageusement, ou du moins a produit une amélioration sensible dans l'état du malade; dans d'autres, ce mode de traitement n'a pas répondu à ce qu'on attendait de lui.

M. Magendie a fait usage, quelquefois avec succès, de l'électricité dans les cas d'affaiblissement de la vue : il dirigeait à cet effet le courant à travers les nerfs de l'orbite. Ayant remarqué que les principaux organes de la vue, le globe de l'œil et le nerf optique n'agissent plus quand ils sont soustraits à l'influence de la cinquième paire, d'où résulte une amaurose, il en conclut qu'il devait exister deux espèces d'amaurose, l'une ayant pour cause une affection de

la rétine et, par suite, du nerf optique, et l'autre une affection du nerf de la cinquième paire. Il a pensé que, dans cette affection, l'électricité pouvait être employée avec avantage sur les diverses branches de la cinquième paire. A cet effet, il a agi sur le nerf sans affecter les parties environnantes; des aiguilles ont été enfoncées en conséquence dans le nerf même. La première expérience a été faite sur un jeune homme atteint d'amaurose avec immobilité de la pupille; une aiguille d'acier fut enfoncée dans le nerf frontal, au point où il vient sortir du trou sourcillier; l'autre aiguille fut introduite dans le nerf sous-orbitaire, à l'endroit où il sort de l'orbite : le malade ressentit chaque fois dans tout le côté correspondant un effet semblable à celui qu'on éprouve en se heurtant le coude. On répéta l'expérience; mais, au lieu de piquer le nerf frontal sur le front on plaça l'aiguille dans l'orbite même, vers le milieu environ de sa longueur; on agit ensuite sur le nerf lacrymal. Ces diverses tentatives n'ayant amené aucune amélioration dans l'état de l'amaurose, on fit passer un courant dans les nerfs au moyen des aiguilles, afin d'exciter indirectement l'action de la rétine et du nerf optique. Deux jours après, les aiguilles furent placées l'une dans le nerf frontal, l'autre dans le nerf maxillaire supérieur, et mises en communication avec les deux extrémités d'une pile à auges composée de douze éléments de 16 centimètres de côté. A l'instant où le circuit fut fermé, le malade éprouva une commotion douloureuse dans le trajet du nerf, la lumière l'affecta visiblement, et la pupille se contracta. Au bout de quinze jours de traitement il y eut une amélioration sensible dans l'amaurose et la pupille reprit ses dimensions ordinaires. M. Magendie a obtenu d'autres résultats satisfaisants en suivant ce mode de traitement.

Pour exciter les nerfs auditifs, on adapte à l'extrémité des conducteurs de la pile une tige de métal renfermée dans un tube de verre et terminée par une boule de métal. Dès que le courant est transmis dans les nerfs auditifs, on entend un bourdonnement plus ou moins fort; l'excitation est transmise jusqu'au nerf optique. Quand on ne veut agir que sur une oreille, on applique le conducteur dans le canal auditif de cette oreille, et l'autre sur une partie contiguë dénudée. On a reconnu que ce mode de traitement était employé avec avantage dans la faiblesse de la vue, dans la surdité et dans l'aphonie incomplète.

En général, on peut appliquer le traitement électrique dans les cas de paralysie incomplète, et lorsqu'il s'agit de surexciter le sys-

tème nerveux; mais lorsque la paralysie est complète et que la vie est éteinte dans les nerfs, les courants électriques doivent être impuissants pour rendre aux muscles la faculté de se mouvoir.

MM. Marianini, Nobili et Matteucci ont donné, chacun, une méthode de traitement pour la paralysie (*). M. Nobili a indiqué, en outre, un mode de traitement du tétanos, en s'appuyant sur les observations qu'il avait faites dans ses expériences sur les contractions de la grenouille et son courant propre. Voici le principe d'où il est parti : quand on applique l'électricité à un membre paralysé, on a pour but d'exciter le système nerveux de manière à rendre au muscle la faculté de se contracter; on ne peut, dès lors, employer l'action continue du courant qui tend à affaiblir l'irritabilité nerveuse; l'action d'un courant discontinu, produisant un effet contraire, doit être préférée. Dans le tétanos, on doit préférer la première action.

M. Matteucci, en prenant en considération les résultats obtenus par ses devanciers, a soumis au traitement électrique un homme pris de tétanos à la suite d'un coup de feu. A cet effet, il a fait passer un courant intense dans la moelle épinière. Les accidents ont disparu pendant le passage du courant; mais le malade ne fut pas guéri pour cela.

M. Duchenne a employé un mode d'électrisation qui consiste à agir dans l'organe malade sans atteindre les organes sains. Il fait contracter tel ou tel muscle en appliquant seulement, à la surface de la peau, des conducteurs humides, des tiges métalliques portant des éponges imbibées d'eau salée, et, dirigeant convenablement l'action des courants électriques. Si la peau est sèche ainsi que les excitateurs, l'électricité ne traverse pas le derme et produit des étincelles sans phénomène physiologique; si l'un des excitateurs est humide et l'autre sec, le point touché par l'excitateur éprouve une sensation superficielle cutanée; lorsque la peau est légèrement mouillée, la sensation superficielle cutanée est sensiblement plus forte; mais, en rendant humides la peau et les excitateurs, il se produit des phénomènes de contraction et de sensibilité très-variables, suivant qu'on agit sur un muscle, sur un nerf ou sur une surface osseuse : dans ce dernier cas, on détermine une douleur vive.

On voit d'après cela qu'il est facile d'arrêter l'effet de l'électrisation sur la peau, de le limiter à volonté dans les organes qu'elle

(*) Becquerel, *Traité de physique appliquée*, t. II, p. 641.

recouvre, c'est-à-dire dans les nerfs, les muscles et les os. Ce procédé permet donc, comme les précédents, mais plus facilement, dans certains cas de paralysie, d'exciter les parties malades, et peu à peu de faire mouvoir les muscles qui avaient perdu toute faculté de contraction.

L'électricité agissant comme force chimique a été encore peu employée, et cependant il est permis de croire que son action dans certaines circonstances doit être des plus énergiques. On a remarqué qu'il se produit en général dans les parties sur lesquelles sont appliquées les électrodes une inflammation suivie quelquefois de suppuration. Ces effets peuvent être attribués, soit à l'excitation résultant de la circulation du courant, soit à son action décomposante, qui produit des principes acides et alcalins réagissant directement sur les parties avec lesquelles ils sont en contact. On peut tirer un parti avantageux de ces réactions pour dénaturer des plaies; c'est ce qui nous est arrivé dans une expérience que l'un de nous (Becquerel) a faite conjointement avec M. Breschet, à l'hôtel-Dieu de Paris, sur un homme ayant à la jambe droite un ulcère rebelle.

Enfin, on peut, au moyen de l'électricité voltaïque, appliquer un moxa dans les régions les plus profondes du corps. On introduit à cet effet, dans la partie affectée, une aiguille de platine que l'on met en communication avec l'un des pôles d'une pile composée d'éléments à larges surfaces, tandis que l'autre pôle est en relation, à l'aide d'une plaque métallique, avec une partie du corps voisine de celle où se trouve l'aiguille : à l'instant de la fermeture du circuit, l'aiguille s'échauffe jusqu'à l'incandescence et brûle les chairs contiguës, en produisant une très-vive douleur de courte durée; il ne tarde pas à se développer une inflammation comme dans l'application du moxa, puis une escarre qui finit par tomber sous forme de tuyau de plume. On pourrait aussi se servir d'un fil conjonctif en platine reployé en un point, de manière à former une sonde ayant un plus petit diamètre que le reste du circuit.

LIVRE V.

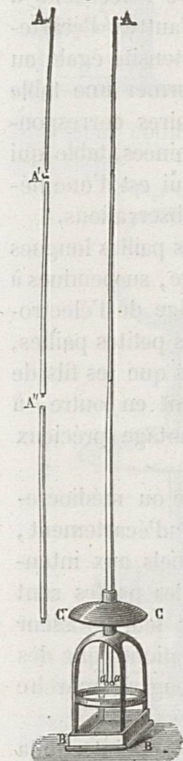
ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE.

CHAPITRE PREMIER.

Des appareils employés dans l'étude de l'électricité atmosphérique.

La terre et l'atmosphère sont de vastes réservoirs d'électricité où la nature va puiser constamment les causes productrices des orages et d'autres phénomènes atmosphériques que nous allons décrire.

Fig. 107.



Avant d'aborder toutes les questions relatives à l'électricité atmosphérique, il faut faire connaître les différents appareils à l'aide desquels on parvient à étudier ces effets.

On se sert d'électroscopes, d'électromètres et de multiplicateurs analogues à ceux que nous avons décrits, livres Ier et IIe, mais disposés d'une manière particulière. Parmi les électromètres dont l'usage est le plus fréquent, à raison de leur facilité de transport dans les voyages, se trouve celui de de Saussure, composé de deux fils fins de métal terminés chacun par une petite balle de sureau *aa*, et adaptés à une tige métallique fixée à la partie supérieure d'une cloche de verre carrée BB, de 5 à 6 centimètres de côté. Les deux petits pendules se trouvent ainsi placés dans l'intérieur de la cloche. La tige est elle-même surmontée d'un conducteur A terminé en pointe, composé de trois parties pouvant s'ajuster les unes dans les autres, et chacune d'une longueur de 2 décimètres environ. Ce conducteur est destiné à recueillir de l'électricité au-dessus de la tête de l'observateur.

Pour préserver l'électromètre de la pluie ou de la neige, on visse à la partie supérieure de la cloche un petit chapeau en laiton laminé fort mince CC, de forme conique et d'un décimètre de diamètre. Le conducteur A s'ajuste également à vis sur ce chapiteau. Une échelle divisée est appliquée sur l'une des faces de la cage de verre, afin d'apprécier les angles d'écart des deux pendules.

De Saussure a gradué comme il suit cet appareil : ayant pris deux électromètres désarmés, aussi égaux entre eux que possible, mais privés de leur conducteur en pointe, il électrisa l'un d'eux, de manière à ce que les deux boules de sureau s'écartassent, par exemple, de 6 millimètres. Avec l'extrémité supérieure de l'autre électromètre, qui n'était point électrisé, il toucha le premier : à l'instant même, l'électricité se partagea entre les deux, et la divergence fut dans l'un comme dans l'autre de 4 millimètres. Il résulte de là qu'une diminution de moitié dans l'intensité de l'électricité n'avait réduit la divergence que d'un tiers. Ayant enlevé l'électricité à l'un des électromètres, il le mit en contact avec l'autre : l'écartement fut de $2^{mm},8$, lequel correspondait à une intensité égale au quart de l'intensité primitive. Il parvint ainsi à former une table donnant les écartements ou les déviations angulaires correspondantes à des charges électriques d'intensité déterminées, table qui change à la vérité d'un appareil à l'autre, mais qui est d'une nécessité indispensable quand on veut comparer les observations.

Volta a substitué aux fils métalliques deux petites pailles longues d'environ 5 centimètres et de 6 millimètres de large, suspendues à deux petits anneaux très-mobiles adaptés à la tige de l'électromètre et qui sont contiguës dans l'état de repos. Ces petites pailles, quand elles sont sèches, sont beaucoup plus légères que les fils de métal armés de petites balles de sureau, et offrent en outre, à égalité de poids, beaucoup plus de surface : avantage précieux dans les expériences de ce genre.

Volta a constaté que lorsque l'appareil est sensible ou médiocrement sensible, sa marche est régulière jusqu'à 20° d'écartement, c'est-à-dire que les angles d'écart sont proportionnels aux intensités électriques. Il a remarqué en outre que, si les pailles sont également longues, une différence sensible dans leur grosseur occasionne à peine quelque différence dans les déviations; que dès l'instant qu'elles ont moins de 27 millimètres de long, la marche de l'instrument n'est plus aussi régulière.

Volta a aussi conseillé de placer à l'extrémité de la pointe de la

tige métallique qui surmonte l'appareil un corps enflammé destiné à établir un courant d'air apportant l'électricité des couches d'air environnantes. Il a obtenu par ce moyen des résultats qui étaient souvent doubles de ceux qu'accusait l'appareil sans la présence d'un corps en ignition. Ce qu'il a trouvé de mieux à cet effet est une espèce d'allumette formée d'une mèche de coton soufrée et placée dans l'intérieur d'une spirale en fil de fer ajustée à la pointe du conducteur.

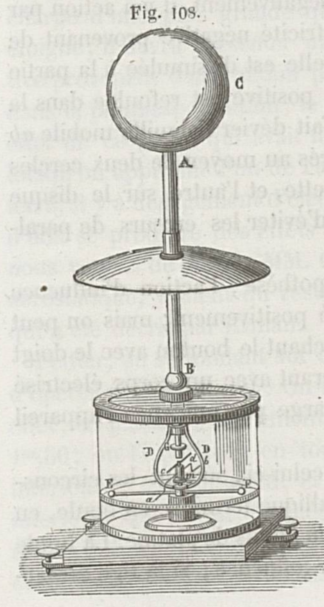
Les appareils de de Saussure ou de Volta se placent dans une boîte de bois ou dans des étuis métalliques, pour les transporter facilement.

Fig. 13.



Quand il s'agit d'observer des quantités d'électricité excessivement faibles, on emploie l'électroscope à feuilles d'or, avec deux armatures D, E, faisant fonctions de condensateurs, et déjà décrit page 20. On lui donne des dimensions diverses, et on termine la partie supérieure soit par une sphère plus ou moins grosse, soit par un conducteur terminé lui-même en pointe ou en boule. On le gradue également comme le précédent. Cet appareil est d'une grande sensibilité.

Fig. 108.



Peltier, en perfectionnant l'électromètre de Rousseau, modifiant la disposition représentée fig. 16, page 23, et y ajoutant divers accessoires, l'a rendu portatif et capable de donner des résultats exacts et toujours comparables. Cet appareil se compose des parties suivantes :

Une tige de cuivre AB, terminée à sa partie supérieure par une boule creuse de même métal C de 1 décimètre de diamètre, et à sa partie inférieure par une boule beaucoup plus petite B, est fixée, par l'intermédiaire de cette dernière, à une tige de cuivre qui descend dans une cage de verre dont elle est isolée au moyen d'un tampon de gomme laque; cette tige se bifurque en formant une espèce d'an-

neau DD, au centre duquel se trouve une pointe *m*, destinée à recevoir une aiguille très-mobile *ab*. L'aiguille *ab* est maintenue constamment dans le méridien magnétique à l'aide d'une aiguille aimantée beaucoup plus petite *cd*, faisant système avec elle et attachée au-dessus de la chape. Indépendamment de cette aiguille, une autre aiguille EF, également en cuivre mais plus forte, est fixée solidement à la tige qui descend dans un tube de verre rempli de gomme laque et encastré dans une tablette de bois; toute la partie métallique se trouve ainsi isolée, de sorte que la perte d'électricité doit être très-faible. L'instrument est posé sur une tablette à trois pieds ou vis, à l'aide desquelles on la met horizontale. La boule B, en tournant autour du tube AB, fait monter ou descendre la partie G de la tige centrale; quand on veut se servir de l'appareil, on élève cette partie G; le système des deux aiguilles *cd*, *ab*, peut alors se mouvoir librement sur la pointe de la tige *m*. Quand l'instrument doit être placé au repos, on abaisse G, et le mouvement des aiguilles se trouve entravé.

Lorsqu'on veut opérer, on oriente l'instrument de telle sorte que l'aiguille fixe EF soit mise dans le méridien magnétique; l'aiguille mobile *ab*, qui se meut avec l'aiguille aimantée, vient se placer parallèlement à la première. La boule C se trouve-t-elle au-dessous d'un corps électrisé positivement ou négativement, il y a action par influence: dans le premier cas, l'électricité négative provenant de la décomposition de l'électricité naturelle est dissimulée à la partie supérieure de la boule, et l'électricité positive est refoulée dans la partie inférieure de l'instrument, et fait dévier l'aiguille mobile *ab* d'un certain nombre de degrés mesurés au moyen de deux cercles divisés, dont l'un est collé sur la tablette, et l'autre sur le disque supérieur de la cage en verre, afin d'éviter les erreurs de parallaxe.

Cet appareil accuse, dans cette hypothèse, l'action d'influence exercée par le corps électrisé chargé positivement; mais on peut charger négativement l'aiguille en touchant le bouton avec le doigt et retirant le corps électrisé. En opérant avec un corps électrisé négativement placé à distance, on charge par influence l'appareil d'électricité positive.

Les électroscopes, et en particulier celui-ci, suivant les circonstances, sont surmontés d'une tige métallique terminée en boule, en pointe, ou par l'adjonction d'un faisceau de fils de platine. La boule est destinée à observer les actions par influence; si la tige est ter-

minée en pointe ou par un faisceau de fils présentant un grand nombre de pointes, l'instrument prend une charge semblable à celle de la région électrisée, attendu que l'électricité de signe contraire, qui est attirée par celle de cette région, s'échappe par les pointes.

En général, l'électromètre de Peltier est muni de la boule à l'extrémité de la tige. Son emploi est basé sur un fait observé par Erman et que nous allons rapporter : Ce physicien avait placé à une certaine hauteur dans l'atmosphère un électroscope à feuilles d'or, sans avoir pu recueillir d'électricité. Il porta dans une couche d'air supérieure un fil de métal placé horizontalement à l'extrémité d'une tige isolante, et l'abaissa ensuite rapidement jusqu'à ce qu'il touchât l'électroscope; l'appareil accusa aussitôt l'électricité positive dans la région où se trouvait le conducteur. L'effet était inverse quand ce dernier se trouvait dans une couche inférieure et qu'on le relevait avec rapidité. Ce fait s'explique facilement : l'atmosphère est chargée d'électricité positive, qui augmente d'intensité à mesure qu'on s'élève, comme on le verra plus loin; la terre, au contraire, se comporte comme si elle était chargée d'électricité négative. Si donc on suppose qu'un corps en équilibre électrique avec un espace donné s'élève ou s'abaisse, c'est-à-dire s'approche d'un espace chargé d'une plus grande quantité d'électricité positive, on s'en éloigne, il devra présenter un excès de tension positive ou négative provenant d'une action par influence; en revenant rapidement dans la première position, le corps reprend l'état naturel. C'est un effet de ce genre qui avait fait penser à quelques personnes que, lorsqu'on approche l'un de l'autre certains corps à la surface de la terre, il y a dégagement d'électricité; comme l'un d'eux se déplace, il doit se produire des effets par influence analogues à ceux dont nous venons de parler. MM. Gay-Lussac et Biot, dans leur voyage aérostatique, avaient du reste observé un effet analogue à celui qui a été décrit par Erman.

Peltier, en se fondant sur cette action par influence, a proposé d'opérer comme il suit : On monte sur une terrasse disposée à cet effet, en plaçant l'instrument sur une tablette supérieure élevée de $1^m,50$; on l'équilibre, en touchant la tige dans la partie la plus inférieure; on redescend, et on place l'instrument sur la tablette inférieure qui lui est destinée. En équilibrant l'instrument, il faut élever le bras le moins possible; car, si on l'élevait assez pour toucher au globe, la main, devenant négative par influence, repousserait

l'électricité négative de la boule, elle neutraliserait la portion positive qu'elle y attirerait, et l'instrument serait chargé négativement au moment où l'on éloignerait la main. Il faut donc toucher la tige le plus bas possible, et même avec un corps fin, comme un fil métallique, pour éviter l'influence de la masse de la main sur le reste de la tige. Étant équilibré pendant son élévation, l'instrument, en l'abaissant, donne des signes d'électricité négative, tandis qu'en l'élevant il en donne de positive. En opérant, il faut avoir égard à cette inversion pour ne pas être induit en erreur sur le véritable signe de l'électricité atmosphérique. On notera donc une tension positive, lorsque l'électromètre donnera un signe négatif en descendant; de même on donnera une tension négative à l'atmosphère, si l'instrument descendu marque un signe positif.

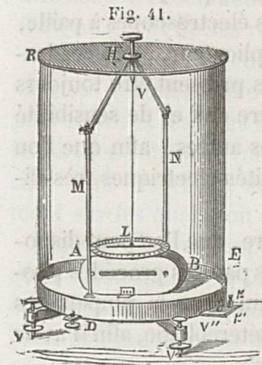
Il ne suffit pas de connaître les angles d'écart de l'aiguille, il faut encore déterminer les forces qui leur sont proportionnelles. Peltier faisait cette détermination au moyen d'une balance de torsion; M. Quételet fait usage de la méthode plus simple et suffisamment exacte de Volta, qui a été exposée précédemment, et qui exige l'emploi de deux instruments parfaitement semblables.

L'électromètre que nous venons de décrire présente des avantages sur les électromètres atmosphériques ordinaires. Il n'est influencé que par l'action inductive de l'atmosphère, ou plutôt par la différence des actions inductives de la terre et de l'atmosphère. Si on élève l'instrument au-dessus de son point d'équilibre ou qu'on l'abaisse au-dessous, et si l'action inductive de l'atmosphère change, tant qu'il reste dans la même position, il ne perd ni dégage d'électricité : la distribution de cet agent est seule changée. En substituant à la boule qui termine la tige une pointe, un faisceau de pointes, ou une mèche allumée, comme dans l'expérience de Volta, il s'ajoute au phénomène d'induction un autre phénomène provenant de l'écoulement de l'excès de l'électricité, qui le complique quelquefois jusqu'au point de le masquer.

On peut également, au lieu d'élever ou d'abaisser l'électroscope dans le lieu où l'on observe, le maintenir à poste fixe et élever rapidement de plusieurs mètres une tige en bois à l'extrémité de laquelle est un fil conducteur isolé dont la partie inférieure communique avec l'appareil; celui-ci indique aussitôt un excès d'électricité positive. Ce mode d'opérer est plus simple, et est analogue à celui d'Erman.

On fait usage aussi de galvanomètres pour étudier les effets de

Fig. 41.



l'électricité atmosphérique. Il est nécessaire alors que le fil soit parfaitement isolé; une de ses extrémités est en communication avec la tige d'un paratonnerre isolé, l'autre avec un fil communiquant au sol; l'électricité qui s'écoule au travers du circuit passe donc dans l'intérieur du galvanomètre. Cet appareil ne donne que des différences; il est moins sensible que les précédents, attendu qu'il faut une très-grande quantité d'électricité pour faire dévier l'aiguille aimantée de quelques degrés; il exige, en outre, un écoulement continu d'électricité. C'est pour ce motif qu'il ne donne que rarement des indications, et que, lorsqu'il est disposé dans un observatoire à poste fixe, ce n'est que lorsqu'il arrive un nuage orageux ou que l'atmosphère est fortement chargée, que l'aiguille aimantée se dévie.

On fait encore usage, pour étudier l'électricité atmosphérique, de ballons, de flèches et de cerfs-volants. Les ballons en baudruche, remplis de gaz hydrogène, sont captifs et pourvus de tous les accessoires nécessaires pour soutirer l'électricité et la transmettre aux électromètres par l'intermédiaire du fil qui les retient et qui est rendu conducteur par l'adjonction d'une partie métallique très-déliée.

Les cerfs-volants sont également munis de parties métalliques; la corde est tissée avec de la soie ou du chanvre et un fil métallique, et le bout libre est mis en communication avec un électromètre isolé. Le fil est enroulé sur un treuil à roue de fer et isolé, lequel est mû au moyen d'une manivelle en verre.

Les flèches sont lancées avec un arc, en opérant comme il suit: on étend sur le sol un morceau de taffetas gommé, sur lequel on déroule un fil de soie recouvert de clinquant d'une centaine de mètres de longueur; l'un des bouts de ce fil est mis en communication avec la tige d'un électromètre à pailles ou à feuilles d'or, au moyen d'un nœud coulant serrant légèrement la tige; l'autre bout est attaché au fer de lance d'une flèche; puis on lance celle-ci avec un arc fortement tendu. La flèche, en s'élevant, emporte avec elle le fil qui, une fois tendu, se sépare de l'électromètre, mais après l'avoir électrisé (Becquerel).

Dans les observatoires où l'on détermine chaque jour les effets de l'électricité atmosphérique, on emploie les électroscopes à paille, à feuille d'or, de Peltier, et parfois le multiplicateur. Mais ces instruments sont disposés de telle manière qu'ils puissent être toujours en fonction; l'on opère avec plusieurs d'entre eux et de sensibilité différente, qui sont placés à côté les uns des autres, afin que l'on puisse avoir des indications pour des intensités électriques très-diverses.

Nous devons dire, en terminant ce chapitre, que l'on peut disposer des appareils qui tracent leurs indications par des procédés photographiques, comme on le fait aujourd'hui dans la plupart des observatoires à l'égard des instruments de météréologie, afin d'avoir une continuité dans la série des observations.

CHAPITRE II.

État électrique de la terre et de l'atmosphère par un ciel serein.

Sous un ciel serein, l'air se comporte toujours comme s'il était électrisé positivement, et la terre comme si elle l'était négativement. On constate l'état négatif de la terre en plaçant l'un des bouts en platine du fil conducteur d'un multiplicateur dans un lieu humide et profond, l'autre dans une partie sèche du terrain ou d'un bâtiment y attenant. En expérimentant de cette manière, Peltier s'est assuré que le sol est constamment négatif, mais à des degrés différents, suivant l'état hygrométrique et la température de l'air. Quand le bout extérieur du fil du multiplicateur est libre dans l'air, l'appareil n'accuse pas toujours de courant, à raison probablement de la mauvaise conductibilité de l'air; la déviation n'a lieu que lorsque la tension est très-forte ou que l'air est suffisamment humide. Il faut faire attention en outre à la polarisation des deux bouts de fil en platine, ou des lames de même métal qui s'y trouvent fixées, laquelle polarisation, se manifestant peu d'instants après que le circuit est fermé, masque les effets que l'on veut observer. Le seul moyen de la détruire est de retirer les bouts ou les lames de platine

des lieux d'observation, de les laver dans l'eau distillée, de les faire rougir et de les remettre ensuite en place.

La quantité d'électricité positive qui existe dans l'air, varie suivant les localités; elle est en général plus forte dans les lieux les plus élevés et les plus isolés; elle est nulle dans les maisons, sous les arbres, dans les rues, dans les cours; elle est néanmoins sensible dans les villes, au milieu des grandes places, et principalement sur les quais, où elle est plus forte qu'en rase campagne.

Pour se rendre compte de ces divers effets, il faut faire attention que, l'atmosphère et la terre se trouvant constamment dans deux états électriques contraires, ces deux électricités doivent se recombiner continuellement dans les couches d'air inférieures jusqu'à une certaine hauteur, par l'intermédiaire des corps situés à la surface du sol; en rase campagne, l'expérience prouve qu'on ne commence à trouver de l'électricité positive qu'à 1 mètre ou 1^m,30 au-dessus du sol; la recomposition s'effectue donc jusqu'à cette hauteur, quand aucune cause étrangère ne vient la troubler. Au delà, l'intensité électrique augmente suivant une loi qui n'est pas connue, laquelle dépend du plus ou du moins de vapeurs qui se trouvent dans l'air. On constate l'accroissement d'électricité positive en élevant au-dessus du sol un ballon, un cerf-volant, ou en lançant des flèches avec un arc. L'expérience avec les flèches a été faite au grand Saint-Bernard, sur un des plateaux qui avoisinent l'hospice. Elles ont été lancées à 80 mètres au-dessus du sol. On a trouvé que, par un ciel parfaitement pur, l'excès de l'électricité positive va toujours en augmentant (Becquerel). Peltier a également constaté ce fait avec un ballon captif; seulement il a reconnu que dans certaines circonstances, lorsqu'il existe dans l'air des nuages à peine visibles, l'électricité devient nulle, puis négative, pour revenir, peu de temps après, positive.

A la surface de la terre, les corps et les appareils sont plongés au milieu d'une atmosphère constamment chargée d'électricité, dont la tension, comme on vient de le dire, va en augmentant en s'éloignant du sol; en s'élevant dans l'air on obtient une charge positive, en s'abaissant une charge négative. Ces effets peuvent s'expliquer de deux manières : 1° en supposant que la terre et l'atmosphère sont constituées dans deux états électriques différents; 2° en admettant que la terre et l'atmosphère sont toutes deux électrisées de la même manière, mais avec des tensions différentes. Ces actions par influence, analogues à celles qui ont été étudiées par Erman, et en général tous

les effets accusés par les électroscopes, peuvent être expliqués dans l'une et l'autre de ces suppositions. Or, comme il est impossible de résoudre l'alternative, nous continuerons à raisonner dans la première hypothèse, les effets étant plus simples à exprimer ; il n'y aurait que de très-faibles changements d'expression à faire pour donner les mêmes explications dans la seconde, car il suffirait de faire intervenir les effets d'influence et les différences de tension.

Des faits observés on tire les conséquences suivantes :

1° Dans les temps sereins, la terre est électrisée négativement, et l'atmosphère positivement.

2° Tout corps placé à la surface de la terre partage son état électrique, lequel augmente d'autant plus qu'il forme une plus grande saillie au-dessus de cette surface (Peltier).

3° Lorsqu'on isole un corps, après l'avoir mis préalablement en communication avec le sol, il se trouve en équilibre de tension avec ce dernier : l'électroscope à feuilles d'or n'accuse alors aucun effet ; mais si le ciel est serein, et qu'on élève l'appareil au-dessus du sol, les feuilles d'or divergent en vertu d'un excès d'électricité positive. En redescendant l'électroscope, le premier équilibre est reproduit, et la divergence devient nulle. Si l'on se trouve sur une partie élevée du sol, il peut se faire qu'en descendant l'appareil, il accuse l'électricité négative. Ces diverses expériences exigent que la tige soit terminée par une boule unie, afin d'éviter les effets d'influence.

4° La tension de l'électricité positive croît à mesure que l'on s'élève dans l'atmosphère.

5° L'eau, à la surface de la terre, qui participe à l'état négatif de celle-ci, se vaporise avec plus de facilité sous l'influence positive de l'air, et d'autant plus que cette influence est plus considérable. Les vapeurs négatives se répandent ensuite dans l'atmosphère, suivant leur densité et la répulsion électrique propre à leurs molécules, tant que ces dernières restent à l'état de globules vésiculaires.

6° Les appareils fixes de peu d'étendue ne sont d'aucune utilité, dans un temps sec et serein, attendu qu'ils restent toujours en équilibre dans le lieu où ils ont été mis et qu'ils ne peuvent laisser échapper l'électricité retenue sur leurs parois, à cause de la sécheresse de l'air.

Il n'en est plus de même lorsqu'ils ont des longueurs considérables, et qu'ils sont par conséquent très-élevés ; dans ce cas, l'appareil perd son électricité d'influence.

7° Lorsque l'air est un peu humide, l'écoulement de l'électricité est favorisé, et l'on peut obtenir des courants continus avec de moindres longueurs de fil, courants que l'on observe à l'aide des multiplicateurs. Il est nécessaire de se mettre en garde contre les effets électriques provenant de l'altération des conducteurs.

Variations de l'intensité électrique de l'air par un temps serein. Variations diurnes. Les faits qui viennent d'être exposés montrent combien sont complexes les variations de l'électricité atmosphérique. De nombreuses observations ont été faites depuis le commencement de ce siècle, et même avant, pour établir ce qu'il y avait de fixe dans ces variations; on a déduit des moyennes les conséquences suivantes: lorsque le ciel est serein, l'excès d'électricité positive, qui est assez faible un peu avant le lever du soleil, augmente peu à peu près de son lever, puis rapidement, et arrive ordinairement quelques heures après à son premier maximum. Cet excès diminue d'abord rapidement, ensuite lentement, et arrive à son minimum quelques heures avant le coucher du soleil; il recommence à monter dès que le soleil approche de l'horizon, et atteint, peu d'heures après, son second maximum, puis diminue jusqu'au lever du soleil; il recommence ensuite le lendemain la même marche.

M. Arago, en 1830, au mois de mars, a fait plusieurs séries d'observations qui lui ont permis de fixer comme il suit les heures des maxima et des minima pendant les jours sereins:

Le 3, un premier minimum à 7 heures 20 minutes du matin; un premier maximum à 9 heures.

Le 4, un premier minimum à 7 heures 10 minutes environ; un premier maximum à 8 heures 15 minutes.

Le 6, le premier maximum à 9 heures 15 minutes du matin.

Le 14, le premier maximum à 9 heures.

Le 16, le premier maximum à 9 heures.

Le 20, le premier maximum à 8 heures 10 minutes.

Le 28, le premier maximum à 9 heures.

La moyenne relative au premier maximum est 8 heures 48 minutes du matin environ: Schubler avait trouvé, pour le mois de mars 1811, 8 heures 30 minutes. Ainsi, à cette époque de l'année, l'électricité atmosphérique atteint son premier maximum un peu avant 9 heures.

Les heures des maxima et des minima, pour la même hauteur atmosphérique, changent suivant les saisons. M. Quetelet a déduit de nombreuses observations faites à Bruxelles les conclusions suivantes:

Le premier maximum arrive, en été, avant 8 heures du matin, et vers 10 heures en hiver; le second maximum s'observe après 9 heures du soir en été, et vers 6 heures en hiver. L'espace de temps qui sépare les deux maxima est donc de plus 13 heures à l'époque du solstice d'été, et de 8 heures seulement au solstice d'hiver.

Le minimum du jour se présente vers 3 heures de l'après-midi en été, et vers 1 heure en hiver. Les observations faites jusqu'ici à Bruxelles ont été insuffisantes pour établir la marche du minimum de la nuit.

L'instant qui représente le mieux l'état moyen électrique de la journée dans les différentes saisons, arrive vers 11 heures du matin.

M. Birt, qui a réuni 15,170 observations faites à Kew, dans une période de cinq années, a pu déterminer l'heure du minimum nocturne, en même temps qu'il a précisé la marche des variations diurnes; sur ce nombre, 14,515 étaient positives, et 665 négatives. Dans la discussion, M. Birt a fait abstraction de l'influence des saisons et de l'état du ciel; il s'est borné à chercher des moyennes générales.

D'après la moyenne de trois années, à chacune des heures d'observation, c'est-à-dire à toutes les heures paires, temps moyen de Greenwich, pendant le jour et la nuit, la tension de l'électricité est à son minimum à deux heures du matin. A partir de cette heure jusqu'à six heures du matin, il y a augmentation graduelle; après cette heure, la tension croît plus rapidement, sa valeur à huit heures du matin est presque double de celle de six heures; l'accroissement est alors plus gradué jusqu'à dix heures, époque du premier maximum, ou maximum du matin. A partir de cette heure, la tension décline graduellement jusqu'à quatre heures du soir, époque où sa valeur n'est que légèrement supérieure à celle de huit heures du matin. Ce second minimum est appelé minimum diurne, pour le distinguer du minimum nocturne; après cela, la tension augmente rapidement jusqu'à huit heures du soir, et, après une légère élévation à dix heures du soir, époque du maximum principal du soir, la marche ascendante de la tension est terminée. Le maximum du soir est notablement supérieur à celui du matin ou de dix heures. Entre dix heures du soir et minuit, la tension décroît presque jusqu'à la valeur du minimum diurne.

D'après les résultats précédents, on a en résumé :

ÉPOQUES des MAXIMUM et des MINIMUM.	BRUXELLES.			KEW.
	ÉTÉ.	HIVER.	ANNÉE.	ANNÉE.
Maximum du matin....	Avant 8h du matin.	10h	9h	10h du matin.
Minimum du soir......	3h après midi.	1h	2h	4h après midi.
Maximum du soir......	Après 9h du soir.	6h	7h ½	10h du soir.
Minimum de la nuit....	»	»	»	2h du matin.

On peut interpréter comme il suit les variations diurnes : vers la fin de la nuit, l'électricité doit avoir une très-faible intensité, parce que l'humidité de la soirée précédente et celle de la nuit qui l'a suivie ont transmis à la terre une partie de l'électricité qui s'était accumulée dans l'air. Quand le soleil commence à réchauffer la terre, les vapeurs s'élèvent, et il n'y a plus d'écoulement vers le sol; lorsque cet astre est parvenu à un certain degré d'élévation, la chaleur augmente, l'air se dessèche, et ne transmet qu'avec peine l'électricité accumulée dans l'atmosphère ; il en résulte que les appareils électriques situés près de la surface de la terre indiquent une diminution de l'électricité, bien que cet agent ne cesse point de s'accumuler dans les régions élevées. Le soleil s'approchant de l'horizon occidental, l'air se refroidit, devient humide et commence à transmettre plus abondamment à la terre, qui est plus refroidie que l'air, l'électricité accumulée dans les régions supérieures. L'intensité électrique doit donc augmenter avec l'humidité et la rosée jusqu'à deux ou trois heures après le coucher du soleil ; elle diminue ensuite graduellement pendant une partie de la nuit, et ne devient jamais nulle, lors même que le ciel est parfaitement serein.

Variations mensuelles. On se livre à l'observatoire de Bruxelles, depuis 1844, sous la direction de M. Quetelet et avec l'électromètre de Peltier, à des observations suivies sur l'électricité de l'atmosphère, dont les résultats sont consignés dans les différents mémoires publiés par lui sur le climat de la Belgique. Ces observations, faites à midi, ont permis d'en déduire les variations mensuelles de 1844 à 1848. Chaque chiffre représente la somme des valeurs observées chaque jour :

MOIS.	1844.	1845.	1846.	1847.	1848.	MOYENNES.
Janvier........	»°	471°	562°	957°	487°	605°
Février........	»	548	256	413	295	378
Mars...........	»	262	95	282	164	200
Avril..........	»	93	94	221	155	141
Mai............	»	163	49	67	59	84
Juin...........	»	51	39	47	48	47
Juillet........	»	58	33	43	61	49
Août...........	90	89	57	11	64	62
Septembre......	91	95	62	39	63	70
Octobre........	110	299	98	107	120	131
Novembre.......	127	334	274	160	152	209
Décembre.......	340	742	799	356	281	507
Moyenne annuelle.	»	267°	202°	225°	162°	206°

Électricité de l'air dans ses rapports avec l'état du ciel.

	JANVIER.	FÉVRIER.	MARS.	AVRIL.	MAI.	JUIN.	JUILLET.	AOUT.	SEPTEMBRE.	OCTOBRE.	NOVEMBRE.	DÉCEMBRE.
Ciel couvert...	268°	220°	129°	17°	46°	36°	41°	56°	42°	75°	109°	181°
Ciel serein....	1133	493	261	149	63	37	35	64	78	168	226	571

Les résultats consignés dans ces deux tableaux conduisent aux conséquences suivantes :

1° L'électricité atmosphérique atteint son maximum en janvier, décroît progressivement jusqu'en juin, où a lieu le minimum d'intensité ; puis elle augmente successivement jusqu'à la fin de l'année.

2° Le maximum et le minimum sont représentés par les nombres 605 et 47, dont le rapport est celui de 13 : 1, c'est-à-dire que l'électricité, en janvier, est treize fois plus forte qu'en juin. Dans les mois de mars et de novembre, les intensités électriques sont égales à la moyenne de l'année.

3° Les maxima et minima absolus de chaque mois suivent une marche semblable à celles des moyennes mensuelles.

En ce qui concerne l'influence exercée par l'état du ciel, on arrive aux conclusions suivantes :

1° Quel que soit l'état du ciel, l'électricité de l'air présente un maximum en janvier, et un minimum vers le solstice d'été.

2° La différence entre le maximum et le minimum est beaucoup plus sensible par les temps sereins que par les temps couverts. Ces différences sont dans le rapport de 7 : 35.

3° Dans le cours de l'année, l'électricité est plus forte quand le ciel est serein que lorsqu'il est couvert, excepté vers les mois de juin et de juillet, à l'époque où l'électricité atteint son minimum. A partir de cette époque, la différence augmente d'autant plus qu'on approche davantage de janvier; le rapport est alors de 4 : 1. Cette forte intensité en hiver, pendant un temps serein, est très-remarquable.

M. Quetelet, en comparant ensemble les observations faites dans des temps de brouillard, de neige et de pluie, a trouvé les résultats suivants :

Pendant les brouillards, l'intensité électrique a sensiblement la même valeur que dans les temps de neige; elle est très-élevée, et correspond aux maxima moyens observés pour les premiers et les derniers mois de l'année. Elle ne paraît pas être influencée par les saisons.

Dans les temps de pluie tranquille, les valeurs observées diffèrent des valeurs ordinaires observées pendant le cours de l'année. Dans quelques cas, on a trouvé une forte tension d'électricité positive ou négative à l'approche de la pluie ou après sa chute.

Dans les quatre années d'observations mentionnées plus haut, l'électricité n'a été trouvée négative que vingt-trois fois à l'heure où l'on observait, et encore une fois seulement dans les mois d'octobre, novembre, décembre et janvier; cet état électrique précédait ou suivait en général des pluies ou des orages. Voici la distribution des vingt-trois électricités négatives : six fois pendant la pluie; neuf fois avant la pluie; cinq fois après la pluie; deux fois pendant des pluies qui tombaient à distances éloignées, une fois sans cause apparente.

Pour se rendre compte de l'influence locale sur les variations mensuelles, nous rapporterons encore, en les mettant en regard, les observations faites à Kew par M. Ronalds, de 1845 à 1847, celles faites à Munich par M. Lamont, et les résultats généraux de Bruxelles de 1845 à 1851. Les observations de Munich, Bruxelles et Kew, faites toutes à midi, ont été rendues comparables par M. Quetetet en prenant pour unité la moyenne mensuelle; les résultats auxquels elles ont conduit se trouvent dans les six premières colonnes (*).

(*) *Mémoires de l'Académie royale de Bruxelles*, t. XIX, p. 31.

MOIS.	NOMBRES OBSERVÉS.			NOMBRES PROPORTIONNELS.			BRUXELLES.	
	Bruxelles.	Kew.	Munich.	Bruxelles.	Kew.	Munich.	Nombres proportionnels.	Nombres observés.
Janvier	518°	182°,4	6°,34	2°,82	2°,40	1°,48	1°,61	50°
Février	333	179,3	5,98	1,81	2,35	1,39	1,45	45
Mars	169	58,2	5,18	0,92	0,76	1,21	1,13	35
Avril	105	40,7	3,04	0,57	0,54	0,71	0,77	24
Mai	81	41,3	2,56	0,44	0,55	0,60	0,65	20
Juin	40	26,8	3,11	0,22	0,35	0,72	0,55	17
Juillet	42	31,8	3,15	0,23	0,42	0,73	0,55	17
Août	62	28,5	3,03	0,34	0,38	0,71	0,68	21
Septembre	74	31,0	2,83	0,40	0,41	0,66	0,81	25
Octobre	140	65,1	3,59	0,76	0,85	0,83	0,03	32
Novembre	230	80,5	5,51 *	1,25	1,34	1,28	1,29	40
Décembre	412	126,3	7,20 *	2,24	1,65	1,68	1,48	46
Année	184	74,3	4,29	12,00	12,00	12,00	12,00	31

* Ces nombres appartiennent à 1830; les précédents, à 1831.

Ces observations montrent que les tensions électriques, en hiver et en été, sont comme 9 : 1 pour Bruxelles; comme 6 : 1 pour Kew, et comme 2 : 1 seulement pour Munich. D'où proviennent des différences aussi grandes? Tiennent-elles à l'imperfection des instruments, à leur disposition ou aux méthodes d'expérimentation, ou à d'autres causes? Nous l'ignorons; mais on doit les mentionner pour appeler à cet égard l'attention des expérimentateurs.

On voit, d'après les observations recueillies et abstraction faite de l'état du ciel, que les plus basses tensions sont en juin et août, celle de juillet étant légèrement supérieure à celle de ces deux mois. En septembre, il y a une faible élévation qui augmente en octobre; cette augmentation devient plus rapide de novembre à janvier, puis elle éprouve un temps d'arrêt, l'augmentation en février étant moindre que celle de décembre et de janvier. En février, on atteint le maximum, auquel succède en mars une diminution rapide de tension, qui se continue en avril et mai, et atteint son minimum en juin.

En ce qui concerne l'électricité négative, voici les principaux résultats de la comparaison : quand l'air était négatif, il est tombé le plus souvent une pluie qui était en général abondante; les cas

où il n'est pas tombé de pluie ont été très-rares : dix fois sur vingt-trois seulement. La charge négative est due au nuage qui déverse de la pluie.

Les principes sur lesquels nous nous sommes appuyés pour expliquer les variations diurnes servent également à rendre compte des variations mensuelles, et en particulier pourquoi, dans les temps sereins, l'électricité de l'air est beaucoup moins forte en été qu'en hiver. L'air, dans le premier cas, étant chaud et sec, résiste avec plus de force à l'écoulement de l'électricité accumulée dans les régions supérieures de l'atmosphère, tandis qu'en hiver l'air humide doit produire un effet contraire. Les résultats suivants ne laissent aucun doute à cet égard ; ce sont les résumés des observations faites par M. Quetelet, à Bruxelles, de 1842 à 1847.

MOIS.	INTENSITÉ ÉLECTRIQUE. MOYENNE des maxima et des minima.	HUMIDITÉ CORRESPONDANTE.
Janvier	49,8	93,7
Février	45,7	92,2
Mars	37,0	90,3
Avril	25,3	89,3
Mai	20,6	87,6
Juin	17,4	84,6
Juillet	18,1	88,1
Août	21,0	88,7
Septembre	25,7	91,8
Octobre	30,4	94,4
Novembre	38,1	95,0
Décembre	50,1	94,7
Année	31,62	99,0

Ainsi quand l'humidité est plus grande, l'intensité électrique est plus forte.

CHAPITRE III.

De l'électricité des nuages ; de la formation et des effets des orages.

Lorsque le ciel n'est pas serein, l'électricité de l'air est tantôt positive, tantôt négative. D'après des observations de Schubler, pendant les orages, lorsqu'il pleut ou qu'il neige, il en est de même : ainsi, pour 71 jours positifs, il y en a eu 69 de négatifs. Il arrive souvent que l'électricité change de signe dans la journée par le passage de nuages possédant l'une ou l'autre électricité.

Quelquefois la tension de l'électricité est tellement forte que la pluie est étincelante.

En général, tous les nuages sont électrisés, comme l'ont reconnu, en 1752, Dalibard et Franklin ; ils ne diffèrent entre eux et ne se distinguent des nuages orageux que par la tension plus ou moins grande de l'électricité qu'ils renferment. Pour donner une idée de la haute puissance électrique de certains nuages, même lorsqu'ils ne lancent pas la foudre, nous rapporterons les résultats obtenus en 1757 par Romas, avec un cerf-volant de $2^{m},33$ de hauteur sur 1 mètre de large, élevé dans les nuages à une hauteur de 183 mètres avec une corde dans laquelle il avait enlacé un fil de métal (*)

« Les effets électriques du même cerf-volant ont été bien autre « chose dans une expérience que je fis le 16 de ce mois, pendant « un orage que j'ose dire n'avoir été que médiocre, puisqu'il ne « tonna presque pas, et que la pluie fut fort menue.

« Imaginez-vous de voir des lames de feu de 9 ou 10 pieds de lon- « gueur et de 1 pouce de grosseur, qui faisaient autant ou plus de bruit « que des coups de pistolet : en moins d'une heure, j'eus certaine- « ment trente lames de cette dimension, sans compter mille autres « de 7 pieds et au-dessous. Mais ce qui me donna le plus de

(*) *Académie des sciences, savants étrangers*, t. II, p. 393, et t. IV, p. 514.

« satisfaction dans ce nouveau spectacle, c'est que les plus grandes « lames furent spontanées, et que, malgré l'abondance du feu qui « les formait, elles tombèrent constamment sur le corps non élec- « trique le plus voisin. Cette circonstance me donna tant de sécu- « rité, que je ne craignis pas d'exciter ce feu avec un excitateur « dans le même temps que l'orage était assez animé, et il arriva « que lorsque le verre dont cet instrument était construit n'eut que « 2 pieds de long, je conduisis où je voulus, sans sentir à ma « main la plus petite commotion, des lames de feu de 6 à 7 pieds « avec la même facilité que je conduisais des lames qui n'avaient « que 7 à 8 pouces. »

Nuages orageux positifs. On explique sans difficulté l'électrisation positive des nuages. Considérons le nuage à l'instant où il se forme dans un air tranquille et possédant un excès d'électricité positive; cette électricité se réunit en couches très-minces à la surface de chaque globule vésiculaire que l'on peut considérer comme bon conducteur. Dans le cas où l'électricité est faible et où les globules sont peu rapprochés, il n'en résulte aucun effet particulier, et le nuage n'est pas encore orageux : seulement il paraît plus fortement électrisé que l'air environnant, parce qu'il est plus conducteur ; si le nuage est très-dense, les vésicules qui le composent sont plus rapprochées, et on peut alors le considérer comme un conducteur continu : toute l'électricité qui se trouvait dans l'intérieur autour des globules vésiculaires se porte donc à la surface où elle est tenue en équilibre par la pression de l'air ambiant. Il suit de là que lorsqu'un nuage orageux se forme, il doit renfermer autant d'électricité que la masse d'air qui lui a fourni tous les globules de vapeur; le nuage ayant une certaine étendue, on conçoit comment une quantité d'électricité dont l'intensité est faible en chaque point, quand elle est disséminée dans un grand espace, acquiert une tension énorme quand elle se porte à la surface du nuage. Tel est le mode de formation des nuages chargés d'électricité positive. Quand ces nuages sont poussés par les vents, ils perdent leur électricité dans leur course, et cessent alors d'être orageux.

Nuages orageux négatifs. Les effets électriques observés auprès des cascades indiquent un des modes de formation des nuages négatifs. Si l'on présente un électromètre atmosphérique armé de sa tige métallique à la pluie très-fine qui résulte de l'éparpillement de l'eau dans le voisinage d'une cascade, on obtient aussitôt des signes d'électricité négative.

Les observations recueillies montrent donc que l'eau en tombant avec une grande vitesse sur des rochers, s'éparpille en globules qui emportent avec eux dans l'atmosphère l'électricité négative inhérente à ces rochers, et par suite à la terre. On ne peut admettre que ce phénomène soit dû au frottement de l'eau sur les rochers, puisque la surface de ceux-ci est constamment humide; du reste, l'eau ne donne d'effet électrique de frottement que lorsqu'elle est entraînée avec de la vapeur à une température élevée et qu'elle vient frapper des corps non conducteurs qu'elle ne mouille pas.

De Saussure a reconnu en outre que des vapeurs ou des nuages qui s'élèvent de la surface de la terre sont négatifs.

On peut se demander maintenant s'il ne se produit pas spontanément dans l'atmosphère des nuages chargés d'électricité négative dont la formation est due à des actions par influence, comme on est porté à le croire lorsqu'on voit dans les temps d'orage les nuages positifs et négatifs se succéder rapidement. Cette influence est mise en évidence surtout par les effets appelés effets de *choc en retour*, dont il sera question plus loin, et qui montrent que la terre peut être dans un état électrique autre que celui qui lui est propre, par suite d'une action exercée par un nuage électrisé. Rien ne s'oppose, par exemple, qu'un nuage dense et fortement positif n'exerce une action à distance sur un nuage faiblement électrisé, ou qui ne l'est pas du tout, et en communication avec la terre. Dans ce cas, l'électricité positive de ce second nuage est chassée dans le sol, tandis que la négative est transportée sur la surface la plus voisine du nuage dense; si alors une cause quelconque vient à rompre la communication de ce nuage avec la terre, il se trouve électrisé négativement.

Le dégagement de l'électricité par influence peut encore intervenir comme il suit pour donner lieu à des nuages négatifs ; la terre exerçant toujours une influence négative, et l'atmosphère une influence positive sur un nuage, il s'ensuit que ce dernier, quand il est à peu de distance de la terre, doit être plus fortement négatif à sa partie supérieure que dans les régions moins élevées; une augmentation de température pouvant dissiper la partie inférieure du nuage, la partie supérieure restera électrisée négativement, et cette fraction de nuage, repoussée par la terre, constituera un nuage négatif. Ces nuages sont du reste moins fréquents que les nuages positifs.

D'après le mode de formation des nuages positifs et négatifs, il résulte qu'une condensation de vapeur, que la formation d'un brouillard est toujours accompagnée d'électricité, et que la pluie doit donner des signes d'électricité. C'est en effet ce que l'on observe.

Hauteur des nuages orageux. Les nuages orageux sont situés à des hauteurs diverses. Certaines roches qui forment la partie culminante des plus hautes montagnes portent souvent des traces de fusion et de vitrification opérées par la foudre; ces effets de fusion ayant été observés au sommet de la montagne de Toluca, par M. de Humboldt, à 4620 mètres au-dessus du niveau de la mer, il en résulte que les orages peuvent se former à cette hauteur; de nombreuses observations prouvent d'un autre côté qu'il s'en forme au-dessous à diverses distances du sol.

Couleur des nuages orageux. Peltier dit avoir toujours observé que les nuages fortement chargés d'électricité négative ont une teinte gris plombé ou d'ardoise, tandis que les nuages positifs sont blancs, rosés, ou orangés. Il assure avoir remarqué que lorsque la teinte de ces derniers nuages se présente après plusieurs jours pluvieux, c'est un indice d'amélioration dans le temps, tandis que le contraire a lieu quand cette teinte se manifeste à la suite de beaux temps, attendu qu'elle indique un commencement de condensation de vapeur. Quand on aperçoit un nuage d'une teinte bleue plombée en tête et blanchâtre à la suite, on est certain de trouver successivement les signes de chacune des deux électricités.

Influence de l'électricité des nuages sur la formation des vapeurs. L'électricité, à raison de sa force répulsive, accélère l'écoulement des liquides dans les tubes capillaires. On a observé en outre qu'en remplissant de liquide deux vases de métal, dont l'un est électrisé et l'autre ne l'est pas, l'évaporation est plus grande dans le premier que dans le second. Beccaria, qui a fait plusieurs expériences de ce genre, a constaté que l'évaporation n'est accélérée que lorsque l'air ne possède pas la même électricité que celle du vase.

Peltier, qui a repris ces expériences en opérant non-seulement avec de l'eau à la température ordinaire, mais encore avec de l'eau chaude afin d'avoir de la vapeur visible, a confirmé cette dernière assertion, et a tiré les conséquences suivantes de ses observations : sur la terre, il doit se produire des actions semblables, puisque la terre est ordinairement négative et l'atmosphère positive. Les vapeurs qui se forment à la surface de la terre, sous un ciel serein, sont nécessairement négatives, et restent telles tant qu'il

n'y a pas d'effets secondaires. Elles s'élèvent, à raison de leur faible densité, de la force répulsive de la terre et de la force attractive de l'air, jusqu'à ce qu'il y ait équilibre entre la pesanteur et les forces attractives et répulsives de l'électricité. Si l'évaporation continue, les vapeurs négatives finissent par occuper les parties supérieures; il résulte de là que les nuages négatifs sont plus élevés que les nuages positifs.

D'après cette hypothèse, la présence d'un nuage blanc (positif) au sommet d'une montagne provoque une évaporation active sur les flancs; mais, comme la quantité de vapeur produite dépasse le point de saturation, il en résulte un amas de globules vésiculaires produisant un nuage gris cendré, chargé d'électricité négative. La teinte grise ne reste pas longtemps uniformément la même partout; la partie supérieure devient plus foncée, parce que cette partie est plus négative que l'autre, à raison de sa plus grande proximité du nuage positif.

Un nuage gris placé au-dessus d'une montagne produit des effets analogues, mais en sens inverse: le nuage qui se forme est blanc et chargé d'électricité positive; puis il perd peu à peu son éclat et devient gris.

Suivant Peltier, cet état de choses se produirait encore dans les temps sereins, et expliquerait les variations horaires de l'électricité atmosphérique. D'après cette hypothèse, vers le soir et pendant la nuit les vapeurs se condensent, et il en résulte une nouvelle distribution de l'électricité sous l'influence du globe; au lever du soleil, l'évaporation recommence, et les vapeurs élastiques se dilatent de nouveau; les premières vapeurs formées sont les plus négatives, les dernières le sont moins, et se trouvent dès lors positives par rapport aux premières; elles forment ainsi des nuages électrisés différemment en se refroidissant.

Formation des orages. Les nuages orageux, ceux qui produisent des éclairs et font entendre le tonnerre, sont en général denses, isolés et d'une grande étendue. Ils se forment ordinairement dans les saisons chaudes, par un temps humide : en effet l'air, parvenu au terme d'humidité extrême, abandonne, par un abaissement de température de quelques degrés, une quantité d'eau beaucoup plus grande que par un abaissement égal à une température moindre. C'est pour ce motif que la formation des nuages orageux est plus fréquente en été qu'en hiver.

La formation des orages peut être due à deux causes : 1° à un

courant ascendant de vapeur qui vient se condenser dans une région plus froide; 2° à la rencontre de deux courants d'air opposés. En général, la première cause donne lieu aux orages pendant l'été, et les orages que l'on observe l'hiver doivent être rapportés à la seconde; dans tous les cas, une condensation subite de vapeur est la condition essentielle de la production d'un orage. Il ne faudrait pas conclure de là que toute condensation de vapeur suivie de pluie abondante soit la cause d'un orage. Cette condensation est bien accompagnée d'électricité, mais la tension n'est pas toujours assez puissante pour donner lieu à des éclairs et au tonnerre; les nuages qui sont produits dans cette circonstance ne diffèrent donc des nuages orageux que par la quantité d'électricité qu'ils renferment.

Dans nos climats, l'été, les orages se forment habituellement lorsque la température est élevée, l'air calme et le ciel serein; la terre humide étant fortement échauffée par les rayons solaires, il en résulte un courant ascendant rapide de vapeurs qui s'élèvent et viennent se condenser dans les parties élevées de l'atmosphère; il peut se produire alors un nuage dense et volumineux qui est fortement électrisé. Lorsque les orages se forment ainsi, ils ont lieu le plus habituellement à l'instant de la plus forte chaleur du jour, et ensuite le ciel peut redevenir serein; mais ce qu'il faut remarquer, c'est que quelquefois, dans la même localité, les conditions restant les mêmes, il se produit un orage plusieurs jours de suite, jusqu'à ce que les vents et les circonstances atmosphériques aient changé. Volta a le premier signalé cette périodicité, qui n'a lieu que pour les orages dus aux courants ascendants, et nullement pour les orages produits par la lutte de deux vents opposés.

Quand l'orage est sur le point d'éclater, les nuages qui le recèlent, suivant Beccaria, éprouvent une espèce de fermentation dont les autres nuages sont privés. Ces nuages, ordinairement très-denses, s'élèvent assez rapidement de quelques points de l'horizon; ils sont terminés par un grand nombre de contours curvilignes et nettement terminés; ils se gonflent, diminuent de nombre et augmentent de grandeur, tout en restant attachés invariablement à leur première base. Entre eux et l'horizon, on aperçoit un gros nuage très-sombre, par l'intermédiaire duquel ils semblent communiquer avec la terre; on voit en outre se former d'autres nuages, sous l'apparence de longs rameaux, et qui, sans se détacher de lui, couvrent graduellement le ciel. Indépendamment de ces rameaux, de ces lambeaux de nuages, on aperçoit çà et là dans l'atmosphère

des nuages légers, dont les mouvements sont brusques, incertains et irréguliers, et que Beccaria a appelés *ascitizi* ou nuages additionnels.

Tels sont les effets qui se passent sur la surface du nuage tournée vers la terre; mais, quand on est placé sur une montagne et en position d'examiner la face supérieure, on voit que, même lorsqu'une couche de nuages semble unie et parfaitement de niveau sur la surface inférieure, la surface opposée présente de très-hautes protubérances et de profondes cavités.

Lorsque les nuages orageux chargés d'électricité contraire se trouvent dans leur sphère d'activité réciproque, de longues étincelles commencent à éclater, même à de grandes distances. Si l'on joint aux attractions et répulsions des nuages l'action de vents contraires qui tendent à leur imprimer des mouvements de rotation et de translation en différents sens, on concevra facilement pourquoi les nuages affectent souvent des formes si bizarres et sont animés de mouvements désordonnés à l'instant où l'éclair brille.

Tels sont les signes avant-coureurs de l'orage quand il est encore éloigné; mais aussitôt que les nuages sont à une distance convenable de la terre, le bruit des décharges électriques se fait entendre, la foudre gronde et les retentissements se prolongent au loin.

Si les causes qui donnent lieu à la formation des orages sont purement locales, ceux-ci sont transportés par les vents, éclatent sur leur passage, et finissent par s'épuiser sans s'étendre de tous côtés. Mais si ces causes embrassent une certaine étendue de pays, alors les nuages électriques, d'abord circonscrits, s'étendent en tous sens, et parviennent à couvrir de vastes surfaces.

Dans certaines circonstances locales, il se manifeste des effets électriques analogues à ceux que produisent les orages; ainsi les phénomènes de la foudre s'observent également dans les nuées qui sortent du cratère des volcans.

Distribution des orages à la surface du globe et suivant les saisons. Les orages se montrent plus fréquemment et sont plus violents sous les tropiques dans la saison des pluies, ou lorsque les moussons changent, que dans d'autres régions.

En Amérique, sous les tropiques, la saison des orages commence à l'époque où le soleil approche du zénith; suivant M. Boussingault, toutes les fois que la latitude d'un point de la zone équinoxiale est de même dénomination et égale à la déclinaison du so-

leil, il doit se former un orage sur ce point. Le ciel, dans la matinée, est souvent d'une pureté remarquable, l'air est calme, la chaleur du soleil insupportable; vers midi, des nuages commencent à se lever sur l'horizon; l'hygromètre ne marche pas au sec, il reste fixe ou s'avance même quelquefois vers l'humidité. C'est toujours après la culmination du soleil que le tonnerre se fait entendre; il est ordinairement précédé d'un vent léger, et bientôt la pluie tombe par torrents. Ainsi, il y a toujours à chaque instant sur la surface de la zone torride, quelle que soit d'ailleurs la position que le soleil occupe sur l'écliptique, un point qui est placé dans les conditions en vertu desquelles les orages se produisent infailliblement. Nous devons donc nous figurer l'atmosphère de l'équateur comme sillonnée continuellement par le feu électrique.

Dans nos climats, les orages n'ont lieu, en général, que dans la saison chaude. Pour que le lecteur puisse suivre la marche des orages de l'équateur aux régions polaires, nous donnons ici, d'après Arago (*), une table dans laquelle les lieux sont classés d'après le nombre moyen de coups de tonnerre entendus dans l'année, et non d'après les latitudes géographiques. Cette table n'étant point encore assez complète, Arago n'a point soumis tous les chiffres à une discussion minutieuse. On peut néanmoins reconnaître, sans dépasser la zone tempérée, que les mois pendant lesquels le tonnerre se fait entendre dans certains lieux sont ceux où il tonne le moins dans d'autres.

(*) *Annuaire du Bureau des longitudes*, 1838, p. 405.

DÉSIGNATION DES LIEUX.	LATITUDE.	LONGITUDE.	NOMBRE D'ANNÉES d'observations.	NOMBRE D'ORAGES.												
				JANVIER.	FÉVRIER.	MARS.	AVRIL.	MAI.	JUIN.	JUILLET.	AOUT.	SEPTEMBRE.	OCTOBRE.	NOVEMBRE.	DÉCEMBRE.	MOYENNE DE L'ANNÉE.
Calcutta	22° 1/2 N.	86° E.	1. (1785).	0	4	6	5	7	8	6	10	9	5	0	0	60
Patna (dans l'Inde), entre mai et décembre.	25°,37′ N.	» »	1. M. Hind.	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	53
Rio-Janeiro	23° S.	43° 1/2 O.	6. M. Dorta (1782 à 1787).	10,2	9,3	4,0	1,7	0,8	0,7	1,3	1,1	2,8	3,7	6,0	9,0	50,7
Maryland (États-Unis)	39° N.	79° O.	1. M. Richard Brooke.	0,0	0,0	5,0	1,0	10,0	8,0	11,0	5,0	0,0	1,0	0,0	0,0	41
Ile de la Martinique (maximum en septemb.)	14° 1/2 N.	63° 1/2 O.	» »	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	39
Abyssinie	13° N.	35° E.	1. M. de Bruce (1770).	0,0	0,0	4,0	4,0	6,0	7,0	3,0	6,0	4,0	4,0	0,0	0,0	38
Ile de la Guadeloupe (maximum en septemb.)	16° 1/3 N.	64° O.	» »	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	37
Viviers (Ardèche)	47° 1/2 N.	2° 1/3 E.	10. (1807 à 1816).	0,0	0,1	0,6	2,2	4,0	3,4	5,1	3,4	3,1	2,2	0,6	0,0	24,7
Québec (Canada)	46° 3/4 N.	73° 1/2 O.	» »	0,0	0,0	0,0	0,6	2,5	5,5	8,0	5,0	1,0	0,5	0,1	0,1	23,5
Buénos-Ayres	34° 1/2 S	60° 3/4 O.	7. Mossotti.	1,9	2,6	2,1	1,8	1,7	1,1	1,3	1,0	2,9	2,3	1,8	2,0	22,6
Denainvilliers, près Pithiviers (Loiret)	48° N.	0° »	24. Duhamel (1755 à 1780).	0,1	0,1	0,5	1,6	3,6	4,5	4,4	3,5	1,5	0,5	0,3	0,0	20,6
Smyrne	38° 1/2 N.	24° 3/4 O.	1. M. de Nerciat.	2,0	4,0	4,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0	1,0	3,0	19
Berlin	52° 1/2 N.	11° O.	15. M. Béguelin.	0,0	0,0	0,1	0,6	2,6	3,9	4,2	5,3	1,5	0,1	0,1	0,1	18,4
Padoue	45° 1/3 N.	9° 1/2 E.	4. (1780 à 1783).	0,0	0,0	1,2	2,2	1,2	3,5	3,5	2,5	0,7	1,0	1,5	0,0	17,5
Strasbourg	48° 1/2 N.	50° 1/2 E.	20. M. Kerrenschneider.	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	17
Maëstricht	51° N.	3° 1/3 E	11. M. Crahay.	0,0	0,1	0,4	1,5	2,5	2,9	3,7	3,3	1,4	0,5	0,1	0,1	16,2
Lachapelle, près de Dieppe	50° N.	1° 1/4 E.	18. De Nell de Bréauté.	0,2	0,2	0,5	1,1	2,6	3,2	2,3	1,8	1,3	0,7	0,8	1,0	15,7
Toulouse	43° 1/2 N.	1° E.	7. (1784 à 1790).	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	15,4
Utrecht (Hollande)	52° N.	2° 3/4 E.	Un grand nombre d'années.	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	15
Tubingue	48° 1/2 N.	6° 3/4 E	9. M. Kraafft.	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	14,6
Paris	48°,50′ N.	0° »	52. (1785 à 1837).	0,1	0,1	0,3	0,8	2,7	2,9	2,6	2,1	1,5	0,5	0,1	0,1	13,8
Leyde (Hollande)	52° N.	2° E.	29. Muschenbroeck.	0,1	0,4	0,2	0,3	2,1	2,7	2,9	2,9	1,0	0,3	0,3	0,2	13,3
Athènes	38° N.	21° 1/3 E.	3. (1833 à 1835).	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	11
Polpero (côte orientale du Cornouailles)	50° 1/3 N.	6° 1/2 O	13. M. Jonathan Couch.	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	10
Pétersbourg	60° N.	28° E.	11. M. Kraafft (1726 à 1736).	0,0	0,0	0,0	0,7	2,7	2,1	2,5	0,9	0,1	0,0	0,1	0,0	9,2
Londres	51° 1/2 N.	2° 1/2 O.	13. M. Howard (1807 à 1822).	0,0	0,2	0,4	0,4	1,8	1,4	2,0	1,3	0,4	0,4	0,2	0,1	8,5
Pékin	40° N.	114° E.	6. Missionnaires (1757 à 1762).	0,0	0,0	0,0	0,2	0,5	2,0	1,7	1,0	0,3	0,1	0,0	0,0	5,8
Le Caire (Égypte)	30° N.	29° E.	2. M. le Dr Destouches (1835 à 1836).	0,1	0,0	0,5	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,5	3,5

Ce tableau montre que le nombre des orages diminue de l'équateur aux pôles comme la quantité de pluie, et devient également moindre en s'éloignant des côtes à latitude égale ; mais, en particulier, les anomalies ne sont pas moins nombreuses que celles que présentent les pluies.

Nous devons à M. Berghauss une carte de la distribution géographique des orages à la surface de l'Europe, à l'inspection de laquelle on reconnaît immédiatement que l'Italie, entre Milan et Naples, d'une part, la mer Adriatique et la Dalmatie de l'autre, forment une région où le nombre des orages est de quarante-deux à quarante-cinq par an. En avançant vers les pôles, on voit aussi que les orages deviennent rares ; au delà du 70° de latitude, ils le sont excessivement.

On a déterminé également la distribution des orages en France : en traçant, dans le nord de la France, deux lignes passant l'une par Brest, Cherbourg et Dunkerque, l'autre par la Rochelle, Orléans et Châlons-sur-Marne, on compte dans la zone comprise entre ces deux lignes de douze à vingt orages par an, le nombre des orages allant en augmentant du nord au sud.

Au sud de la seconde ligne et à l'ouest des Cévennes, le nombre annuel des orages est de dix à douze, et il est d'autant plus fort que l'on s'avance davantage vers le midi.

Dans la région des Alpes françaises entre Lyon et Arles, les Cévennes et le Piémont, le nombre des orages est en moyenne de vingt-cinq ; à Marseille, il n'est que de onze.

A latitude égale, le nombre des orages augmente en général en allant de l'ouest à l'est ; cela a lieu aussi pour les orages d'été, tandis que celui des orages d'hiver diminue. La France, comme presque toute l'Europe, appartient donc à des régions à orages d'été, tandis qu'en s'approchant des côtes de la Méditerranée, les orages d'automne tendent à devenir prépondérants (Martins).

Nous donnerons encore, d'après M. Kæmtz, la distribution des orages dans les différentes parties de l'Europe, la Scandinavie exceptée. En représentant par 1000, le nombre total des orages de l'année, on a pour les quatre saisons :

RÉGIONS.	HIVER.	PRINTEMPS.	ÉTÉ.	AUTOMNE.
Europe occidentale............	80	177	525	200
Suisse.....................	4	206	600	100
Allemagne..................	14	244	660	82
Europe centrale.............	0	137	793	50

Des causes locales s'opposent souvent à ce que les généralités que nous venons de signaler se vérifient. Ainsi, il arrive quelquefois que, dans l'intérieur d'un même pays, la distribution des orages est fort inégale. Les nuages orageux suivent de préférence certaines directions, certaines vallées, et il se forme quelquefois des lignes de partage, c'est-à-dire que souvent une montagne et même une colline suffit pour dévier un orage; un sommet même isolé peut le partager. Ces effets paraissent se rapporter uniquement aux obstacles mécaniques dus aux inégalités du sol. On sait, en effet, que des courants d'air froid sont dirigés du nuage vers le sol et accompagnent l'orage; si ces courants d'air rencontrent un obstacle, ils le contournent, et, en réagissant sur le nuage, peuvent changer sa marche. C'est ainsi que l'on conçoit que certaines localités peuvent être en partie préservées des orages.

Lueurs électriques. La réunion des deux électricités entre les nuages orageux et la terre ne s'effectue pas toujours par des décharges donnant lieu aux effets de la foudre: souvent cette réunion s'opère lentement par l'intermédiaire des corps placés à la surface du sol, et se manifeste par des aigrettes et des lueurs plus ou moins vives, principalement aux extrémités des corps terminés en pointe. Quelquefois ces lueurs apparaissent sur la tête des individus, à l'extrémité des objets qu'ils portent à la main, sur les pointes des lances et des fusils des soldats, etc.

Ces feux électriques sont plus fréquents en mer, à l'extrémité des mâts et des vergues que sur terre, parce que l'électricité n'a pas d'autre conducteur pour se rendre dans l'eau. Ils y sont connus depuis un temps immémorial sous les noms de Castor et Pollux, de feux Saint-Elme. Dans de très-fortes tempêtes, on en a vu quelquefois sous la forme de langues de feux qui faisaient entendre de petites détonations.

On a des exemples de pluies étincelantes, de neige et de grêle lumineuses; ces effets sont dus à ce que les particules aqueuses viennent de régions fortement électrisées.

On a cité des exemples de nuages lumineux; mais, ne voulant pas préjuger la question et admettre sans nouvel examen que la haute tension électrique des nuages peut les rendre visibles, nous nous demandons si plusieurs phénomènes météoriques lumineux n'ont pas existé simultanément, et si ces effets ne sont peut-être pas compliqués de ceux de l'aurore boréale. On ne sait pas non plus si les brouillards, tels que celui de 1783, que l'on prétend avoir été lumineux, doivent leur lumière à une action électrique.

Il ne faut pas ranger au nombre des effets dus à l'électricité les lueurs que l'on observe près des endroits marécageux et des cimetières, et qui sont le résultat de décompositions chimiques.

Éclairs. L'éclair qui sillonne l'espace compris entre deux nuées n'a qu'une durée qui n'atteint pas un millionième de seconde (*), attendu que la vitesse de l'électricité est du même ordre que celle de la lumière (voir page 115).

Le son parcourant 340 mètres par seconde, il doit s'écouler, entre l'apparition de l'éclair et la détonation autant de secondes qu'il y a de fois 340 mètres entre le lieu où l'on est et celui où éclate la foudre. Delisle a compté une fois 672 secondes entre l'éclair et le tonnerre : c'est l'intervalle le plus long dont fassent mention les recueils météorologiques; ce nombre donne, pour la distance de l'observateur au nuage où l'éclair s'est montré, 24,264 mètres ou 6 lieues.

Quand l'éclair brille sans être suivi d'un coup de tonnerre, on est assuré que le lieu où s'opère la décharge est situé à une distance telle de l'observateur, que le son est inappréciable.

Les éclairs dits de chaleur, parce qu'ils brillent dans les belles nuits d'été, ne sont probablement que la réverbération sur des couches atmosphériques plus ou moins élevées, d'éclairs ordinaires produits dans des nuages orageux que l'on ne peut apercevoir à cause de la forme arrondie de la terre. Ces éclairs silencieux, étant engendrés au milieu de nuages situés à de très-grandes distances de l'observateur, le bruit des détonations et du roulement du tonnerre ne peut parvenir jusqu'à lui.

M. Duperrey cite dans les tableaux de routes de la corvette *la Coquille*, publiés en 1829, un exemple de la distance extraordinaire à laquelle on peut apercevoir la lueur des éclairs; cette lueur avait pris naissance au milieu de nuages orageux situés à soixante lieues de distance.

(*) Voir *Annuaire du Bureau des longitudes pour* 1838, p. 267.

L'éclair suit toujours une ligne courbe ou brisée, effet que l'on a attribué à la propriété que possède l'électricité de suivre toujours la ligne qui offre le moins de résistance à sa transmission ; dans les fortes décharges, l'air étant plus ou moins comprimé, l'électricité cherche, dit-on, la partie où l'air est le moins condensé ; elle se dévie alors de la ligne droite pour suivre une ligne brisée ou courbe.

Du reste, on a remarqué que l'éclair parcourt souvent des distances de plusieurs lieues ; cet effet pourrait provenir, indépendamment de l'action par influence, de la présence de nuages isolés ou de globules vésiculaires servant d'intermédiaires pour opérer la décharge. Il se produit dans cette circonstance l'effet que l'on remarque avec la bouteille de Leyde étincelante ou avec le tableau étincelant. On a vu effectivement, page 342, que les particules métalliques séparées agissent par influence comme un conducteur imparfait, et servent à décharger continuellement les condensateurs.

M. Dumoncel explique la forme en zigzag de l'éclair, en disant qu'il s'opère dans l'air, entre un corps électrisé et un corps qui ne l'est pas, ou entre deux corps chargés d'électricité contraire, des décharges avec bruit et production de lumière quand la tension de l'électricité est suffisamment énergique, et à une distance d'autant plus grande que la résistance de l'air est diminuée par une cause quelconque ; l'air raréfié et tous corps interposés, conducteurs ou médiocres conducteurs, tels que les corps métalliques réduits à un grand état de ténuité, la poussière de charbon, les liquides très-divisés ou déposés en couches très-minces, sont autant de causes qui facilitent la décharge. Dans les temps d'orage, il existe dans l'air çà et là des couches très-minces de vapeurs vésiculaires qui jouent le rôle de conducteurs imparfaits ou secondaires, lesquelles servent à transmettre les décharges entre les nuages à de grandes distances, et suivant des lignes sinueuses qui sont en rapport avec la présence de ces vapeurs sur tel ou tel point.

Ordinairement les éclairs sont blancs ; quelques météorologistes prétendent en avoir observé de teintes semblables à celles que présente la lumière électrique dans un air plus ou moins raréfié.

On distingue trois classes d'éclairs : les éclairs de la première classe ont la forme d'un sillon de lumière, mince, serré, très-arrêté sur les bords, se mouvant en zigzag et pouvant se bifurquer ou se diviser en plusieurs branches. Ces éclairs peuvent être comparés aux étincelles que l'on tire d'une machine électrique ordinaire.

Les éclairs de la deuxième classe comprennent ceux dont la lumière, au lieu d'être concentrée en un trait lumineux, occupe un espace considérable. La décharge électrique, dans cette circonstance, paraît avoir lieu à l'intérieur des nuages et en éclairer la masse. Ces éclairs, qui sont les plus communs, peuvent être comparés à l'étincelle brillante, large et peu longue, qui résulte de la décharge d'une batterie électrique dans laquelle l'électricité est fortement condensée. La teinte de ces éclairs est souvent d'un rouge très-intense, mêlé quelquefois de blanc ou de violet.

Les éclairs de la troisième classe diffèrent des précédents sous le rapport de la vitesse et de la durée. Ils sont visibles pendant une, deux et même dix secondes, de sorte qu'ils peuvent se transporter des nuages vers la terre pendant un temps assez appréciable pour que l'on puisse suivre de l'œil leur mouvement. Leur forme approche de celle d'une sphère : ce sont de véritables globes de feu qui se divisent parfois, et rebondissent sur terre à plusieurs reprises; ils ont des mouvements tantôt lents, tantôt rapides, et quelquefois en éclatant ils font entendre un bruit comparable à la détonation de plusieurs pièces de canon. Il est à remarquer que la foudre se présente en général sous cette apparence quand elle pénètre dans l'intérieur des édifices.

Jusqu'ici on n'a pu donner une explication satisfaisante de leur formation et de leur nature. On ignore donc tout à fait leur origine. Celle qui est la plus probable consiste à admettre que ces globes de feu sont produits par un écoulement continu d'électricité dû à l'action des nuages supérieurs, et ayant lieu là où l'on observe le phénomène; la marche de ce globe ne serait que le résultat du déplacement du point par lequel l'écoulement électrique a lieu.

Bruit du tonnerre. Le bruit du tonnerre et le roulement qui l'accompagne sont la conséquence d'une décharge analogue à celle de la bouteille de Leyde. Ce roulement, ce retentissement du tonnerre au loin, provient de ce que l'air a été ébranlé plus ou moins fortement par l'électricité, d'où résulte un déplacement dans les parties les plus voisines du nuage, et conséquemment une suite de condensations et de dilatations qui, se propageant au loin, produisent des retentissements longtemps prolongés.

M. Pouillet part d'un autre principe : suivant lui, si telle était la cause du retentissement du tonnerre, le passage d'un boulet de canon dans l'air devrait produire un effet semblable, ce qui n'est pas, puisqu'il ne fait entendre qu'un sifflement. Il pose en principe que,

l'électricité ne pouvant éclater entre deux corps qu'autant qu'il y a décomposition et recomposition d'électricité entre toutes les parties qu'elle traverse, il doit en résulter des vibrations plus ou moins violentes dans la matière pondérable. Le bruit serait donc le résultat de ces vibrations qui se propageraient dans toute la masse environnante. Si l'on considère maintenant un éclair d'une longueur de quelques mille mètres, il devra briller successivement, quoiqu'à des intervalles excessivement rapprochés, entre tous les espaces qui séparent les molécules aériennes; en outre, l'ébranlement se produira en même temps que l'éclair; mais, comme le son n'a qu'une vitesse de 340 mètres environ par seconde, tandis que celle de la lumière est excessive, il s'ensuit que si un observateur se trouve sur la ligne de l'éclair à une distance de 340 mètres, il y aura d'abord un éclat de lumière, puis silence absolu pendant une seconde; immédiatement après, le bruit commencera à lui parvenir; d'abord celui qui est produit par la vibration excitée dans la couche la plus voisine de lui, et ensuite successivement, sans interruption, le bruit des autres couches, jusqu'à celui qui provient des dernières couches ébranlées.

L'exemple du canon ne nous paraît pas concluant, car les circonstances ne sont pas les mêmes dans les deux cas : la vitesse du boulet est très-appréciable, tandis que celle de l'électricité ne l'est pas sensiblement; par conséquent le refoulement de l'air, qui croît peut-être avec le carré de la vitesse, doit être infiniment plus considérable que dans le passage du boulet, et rien ne s'oppose qu'avec l'électricité, les condensations et dilatations successives ne produisent des détonations avec retentissement.

Il reste à expliquer alors le bruit du tonnerre, auquel on a donné le nom d'*éclat*. Arago, qui a étudié cette question, a cherché jusqu'à quel point les échos pouvaient intervenir dans la production du phénomène. Le roulement du tonnerre peut durer quarante-cinq secondes et même au delà : existe-t-il des exemples d'échos pouvant donner lieu à d'aussi longs roulements? Scoresby en cite un près des lacs de Kilarney; il a entendu le bruit de la décharge d'un pistolet pendant une demi-minute.

Les marins, à la vérité, assurent qu'on entend également le roulement de la foudre en pleine mer, là où il n'existe aucun objet terrestre capable de réfléchir le son. Mais, en faisant cette objection, on admet donc que les nuages ne jouissent pas de la même propriété. Muschenbroek avance avoir observé dans une localité où

la décharge du canon ne fait entendre qu'un seul coup quand le ciel est serein, ce bruit se répète plusieurs fois si le temps est couvert; cette observation a été faite aussi dans les expériences sur la vitesse du son, qui ont eu lieu entre Villejuif et Montlhéry.

Le docteur Robert Hooke, qui a établi une relation entre les éclairs simples et les éclairs composés ou multiples et les coups de tonnerre qui les suivent, admet que chacun des éclairs simples n'occupe qu'un point dans l'espace, et produit un bruit court et instantané; le bruit des autres, au contraire, est un roulement prolongé, par la raison que, les différentes parties des longues lignes que ces éclairs occupent se trouvant en général à des distances diverses, les sons qui s'y engendrent, soit successivement, soit au même instant physique, doivent employer des temps graduellement inégaux pour venir frapper l'oreille de l'observateur. On voit par là, suivant lui, l'étroite liaison qui existe entre les éclats du tonnerre et les zigzags des éclairs. Cette circonstance, jointe aux effets des éclairs, rendrait compte des roulements prolongés de la foudre.

Effets qui accompagnent la foudre. La foudre, n'étant que de l'électricité à forte tension, doit produire des effet mécaniques, physiques, chimiques et physiologiques semblables, si ce n'est que leur intensité est beaucoup plus considérable. Nous allons décrire les principaux effets.

Effets mécaniques, de transport, etc. Quand la foudre suit des corps conducteurs interrompus par des corps non conducteurs, elle brise ces derniers pour reprendre sa route à travers les premiers; c'est ainsi qu'elle projette en l'air des pièces métalliques scellées dans les murs. Il est à remarquer que c'est en général à l'entrée et à la sortie des métaux que ces effets se manifestent.

Les effets mécaniques sont très-variés; tantôt c'est un transport d'objets, tantôt ce sont des projections qui ont lieu de bas en haut ou latéralement. Ainsi, dans la nuit du 14 au 15 avril 1718, un coup de tonnerre fit sauter le toit et les murailles de Gouesnon, près de Brest, comme aurait fait une mine; des pierres furent lancées dans tous les sens jusqu'à une distance de 51 mètres.

Le 6 août 1809, à Swinton, à 5 milles de Manchester, le tonnerre, en tombant sur la maison de M. Chadwick, produisit des effets mécaniques des plus remarquables. Après des roulements répétés d'un tonnerre éloigné et qui semblait s'approcher, on entendit une explosion épouvantable, qui fut immédiatement suivie de torrents de pluie. Pendant quelques minutes, la maison fut entourée d'une

vapeur sulfureuse; un mur en brique, d'un mètre d'épaisseur et de 3^m,63 de hauteur, fut arraché de ses fondations et soulevé en masse; l'explosion le transporta verticalement, sans le renverser, à quelque distance de là; l'une des extrémités avait avancé de 3 mètres et l'autre de 1^m,33. Ce mur pouvait peser environ 26,000 kilogrammes. Nous pourrions multiplier les citations des effets de ce genre, mais les deux exemples qui précèdent suffisent pour montrer la puissance de l'électricité agissant comme force mécanique.

La foudre transporte avec elle, quand elle frappe des bâtiments, des matières pondérables dans un grand état de ténuité; ces matières sont composées de fer, de soufre, de charbon, etc. Fusinieri a remarqué que ces dépôts sont d'autant plus marqués que l'électricité éprouve plus de difficulté à traverser les corps, et qu'à mesure qu'elle dépose de la matière, elle en prend de nouvelle dans les corps qu'elle traverse.

Nobili a observé sur des pierres détachées par l'effet de la foudre une couche de sulfure de fer d'un demi-millimètre d'épaisseur, et même des cristaux de ce composé, lesquels, d'après leur position, paraissent avoir été formés dans le trajet de la foudre à travers le métal.

M. Boussingault a reconnu l'existence de l'oxyde de fer sur des arbres foudroyés, ainsi que celle d'une matière charbonneuse sur des roches syénitiques.

Plusieurs voyageurs ont constaté l'existence du fer métallique sur diverses roches. Il semblerait résulter de là, comme du reste Fusinieri l'a avancé, que le fer existe dans les nuages orageux, et qu'il est enlevé aux roches situées à la surface de la terre, principalement aux cimes des montagnes.

Nous ne devons point passer sous silence enfin les effets mécaniques remarquables opérés par la foudre sur le bois; non-seulement elle le brise, mais elle le divise en lattes excessivement minces. On a vu des portions d'arbres, dans toute leur séve, desséchées et divisées en longues tiges minces après avoir été foudroyées. Ces effets sont dus à ce que, les liquides qui humectent le bois étant seuls conducteurs, lorsque la foudre le frappe, l'action se porte entièrement sur ces liquides, les vaporise peut-être, et par suite divise les parties frappées en lattes longitudinales, dans le sens des fibres.

Effets calorifiques. La foudre casse, brise, enflamme et fond les corps qui sont mauvais conducteurs, combustibles, métalliques ou

fusibles. On cite un coup de foudre qui fondit dans toute son étendue une chaîne de 40 mètres de long, en communication avec la mer par l'une des extrémités, et dont le diamètre des divers chaînons n'excédait pas 6 millimètres.

Quand la foudre traverse des fils métalliques qu'elle ne peut fondre, elle les raccourcit, comme le fait l'électricité ordinaire (voir page 308); on cite en effet des fils de fer servant de cordons de sonnettes et qui furent raccourcis après l'action de la foudre. Lorsqu'elle fond des métaux, elle laisse des traces de leur fusion sur les murs, les bois contigus et même sur le corps des personnes foudroyées qui portaient sur elles des pièces métalliques.

La foudre, en traversant les corps et comprimant l'air, dégage assez de chaleur pour enflammer rapidement les liqueurs alcooliques et les substances ténues, telles que la paille, le foin, le coton. Ces effets d'inflammation sont les plus fréquents quand la foudre tombe sous la forme d'éclairs en boule.

Les bulles et couches vitreuses que les voyageurs ont observées sur les sommets des hautes montagnes sont rapportées à des effets dus aux décharges électriques : on est d'autant plus porté à admettre cette explication que ces enduits sont semblables à ceux que l'on remarque sur les briques et sur les autres substances fusibles non conductrices frappées de la foudre.

Lorsque la foudre tombe sur un point quelconque du sol, elle suit toujours les corps meilleurs conducteurs qui se présentent à elle pour se rendre dans l'intérieur; mais si, pour atteindre les nappes d'eau à une certaine profondeur au-dessous du sol, elle est obligée de traverser des masses plus ou moins considérables de sable ou de matières capables d'être fondues à une température élevée, il se forme alors, dans la direction de la décharge, des tubes vitrifiés appelés *tubes fulminaires*. On les reproduit sur de petites dimensions en faisant passer la décharge d'une très-forte batterie à travers du verre pilé en poudre.

Effets magnétiques. Quand la foudre traverse des barres de fer, elle y produit des effets magnétiques semblables à ceux que l'on obtient avec l'électricité, lesquels seront exposés en traitant de l'électro-magnétisme.

Il arrive quelquefois qu'après un orage, lorsque la foudre a éclaté, les chevilles en fer, les clous et même les aiguilles possèdent la propriété magnétique.

Les orages altèrent quelquefois l'aimantation des aiguilles de

boussole; ils peuvent également déranger la marche des chronomètres, comme M. Duperrey a eu l'occasion de l'observer dans son voyage sur la *Coquille* (*Part. hydrog.*, p. 19).

Les montres marines qui se trouvaient à bord avaient été fixées, le 27 octobre 1823, de la manière suivante :

N° 118, de Louis Berthoud......	— 5″,3
N° 160........................	— 26,2
N° 26, de Mote...............	+ 10,1

En partant d'Amboine pour se rendre au port Jakson, il dirigea sa corvette de manière à prendre connaissance de Timor et des îles Java. « Dans ce premier trajet, dit M. Duperrey, et notam-« ment en vue de Timor, de fréquents orages, dans lesquels la « foudre éclatait souvent avec un fracas extrême auprès du bâtiment, « sont venus nous assaillir. La conséquence de ces orages est qu'à « notre arrivée auprès des îles Java, dont la différence en longi-« tude avec Amboine avait été exactement déterminée en 1792, « dans le voyage d'Entrecasteaux, aucune des montres de la *Co-« quille* ne s'est trouvée en état d'en fixer la position; leur marche « diurne observée à Amboine n'était plus la même. Ces montres, « qui jusqu'alors permettaient de compter sur la longitude à moins « de 5′ de degré près, étaient en erreur aux îles Java de 15 à « 20′, et plus tard, à l'arrivée de la corvette au port Jackson, elles « ont placé le bâtiment à plus de 40 lieues dans l'intérieur de la « Nouvelle-Hollande. »

Elles furent réglées au port Jackson, et voici quelle fut leur nouvelle marche diurne, le 19 janvier 1826 :

N° 118....................	+ 7″,0
N° 160....................	— 18,7
N° 26......................	+ 27,6.

On voit par là que les trois montres ont eu leur mouvement accéléré; mais, comme cette nouvelle marche diurne donne avec exactitude la différence de longitude entre Java et le port Jackson, on ne peut attribuer le changement survenu dans leur marche observée à Amboine qu'aux violents orages qui, dans les parages de Timor, ont été si bruyants et si multipliés autour de la corvette.

Effets chimiques. Non-seulement la foudre enflamme les matières combustibles, fond les métaux ainsi qu'on l'a vu, mais elle détermine en outre la combinaison de l'oxygène avec l'azote, d'où

résulte de l'acide nitrique, qui se combine avec les bases libres se trouvant dans l'atmosphère, la chaux, l'ammoniaque, etc. Les combinaisons formées se retrouvent dans les eaux pluviales qui se déversent en temps d'orage.

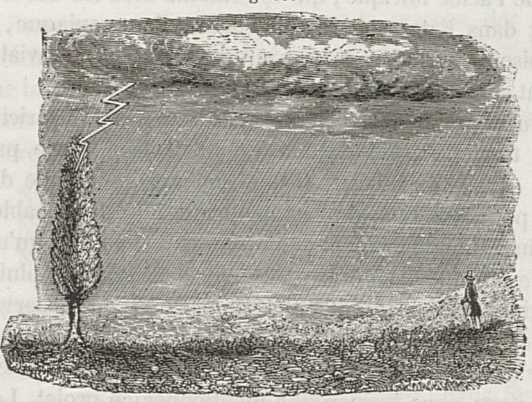
On a vu, pages 292 et suivantes, que l'action de l'électricité, même à faible tension, sur l'oxygène, donnait lieu à une production d'ozone qui, en réagissant ensuite sur l'azote humide de l'atmosphère, pouvait donner de l'acide nitrique. Il est probable qu'il se forme ainsi continuellement de l'ozone dans l'air, et qu'une partie de l'acide nitrique des nitrates recueillis dans l'eau de pluie lui doit son origine. On a proposé de déterminer dans les observatoires la production d'ozone aux différents instants de la journée; mais la difficulté de doser ce corps, ainsi que le manque d'observations, fait que nous nous bornerons à mentionner ce projet. Lorsque la foudre éclate, l'odeur sulfureuse qui se manifeste doit sans doute encore être rapportée à la production de l'ozone.

On est dans l'habitude d'attribuer à la présence de l'électricité à forte tension dans l'air, l'acescence du lait et la corruption des chairs, qui sont plus promptes dans la saison des orages que dans toute autre. On ne sait rien de positif à cet égard; peut-être ces effets dépendent-ils de la température élevée dans la saison où se manifestent ces phénomènes.

Effets physiologiques. Suivant l'intensité de la foudre, les hommes et les animaux sont tués ou seulement contusionnés ou paralysés dans quelques parties. Quelquefois ils sont préservés de ses atteintes par un vêtement de soie ou une étoffe non conductrice. La foudre détermine des lésions dans les organes, et particulièrement dans le système vasculaire, par suite desquelles il y a épanchement du sang et d'autres liquides qui occasionne instantanément la mort; à raison de ces désordres, la putréfaction s'y manifeste très-promptement.

Choc en retour. Quelquefois des personnes ou des animaux peuvent être foudroyés à distance d'un nuage orageux par un effet d'influence facile à expliquer. Toutes les fois qu'un nuage est fortement électrisé et qu'une personne se trouve dans sa sphère d'activité, l'électricité naturelle de cette personne est décomposée par influence; celle de nom contraire à l'électricité du nuage est attirée, et l'électricité de même nom est repoussée dans le sol; la personne se trouve donc dans un état électrique contraire à celui du nuage. Mais, si le nuage vient à se décharger en un point quelcon-

Fig. 109



que, sur un arbre, par exemple, comme l'indique la figure 109, même à une assez grande distance, alors, perdant tout à coup une portion de son électricité, il ne peut plus maintenir dans un état électrique contraire la personne qui est située au-dessous de lui; celle-ci cesse donc tout à coup d'être électrisée par influence. L'énergie de la secousse est en rapport avec la charge du nuage, et peut être assez forte pour donner la mort. La personne est alors foudroyée par un effet de choc en retour.

Il n'est peut-être pas sans intérêt de donner le nombre de personnes foudroyées annuellement dans différents pays, d'après une statistique dont les documents ont été puisés dans les archives du ministère de la guerre (Boudin).

D'après cette statistique, le nombre des personnes tuées en France par la foudre s'est élevé, en 1835, à 111, et en 1847, à 108; il n'est question, bien entendu, que des personnes tuées roides, et non de celles qui ont été plus ou moins blessées. Or Volney comptait aux États-Unis, dans un seul trimestre, 17 personnes tuées par la foudre et 86 blessées grièvement. En partant de cette base, qui, il faut le dire, est peu certaine, on en tire la conséquence que le nombre des individus frappés doit être au moins trois fois plus considérable que celui des personnes tuées sur le coup. Il s'ensuivrait qu'en France le nombre des personnes frappées annuellement par la foudre dépasserait 200.

Dans d'autres pays, on trouve que le nombre de personnes tuées annuellement est en moyenne :

De 3 en Belgique,

De 9,64 en Suède,
De 22 en Angleterre.

En construisant une carte géographique indiquant la répartition par départements des morts causées par la foudre, cette carte permet d'en tirer les conséquences suivantes :

1° Aucun département français n'échappe complétement aux accidents de la foudre.

2° Les accidents sont très-irrégulièrement répartis entre les divers départements. Le maximum correspond aux départements du plateau central et à quelques autres départements montagneux. Ainsi on trouve annuellement 2 décès dans l'Eure; 3 dans Eure-et-Loir et le Calvados; tandis qu'ils s'élèvent à 20 dans le Cantal, à 26 dans l'Aveyron, à 27 en Corse, à 28 dans Saône-et-Loire, à 44 dans la Haute-Loire, et à 48 dans le Puy-de-Dôme.

En supputant le nombre des foudroyés par mois, on trouve en France, sur 103 personnes tuées, en janvier, 0; février, 0; mars, 4; avril, 6; mai, 8; juin, 22; juillet, 13; août, 19; septembre, 14; octobre, 15; novembre et décembre, 0. On voit par là que les quatre mois les plus froids ne présentent aucune victime.

Le maximum des personnes tuées par un seul coup de foudre ne dépasse pas 8 ou 9.

Il paraîtrait, d'après les renseignements recueillis, que les animaux sont beaucoup plus maltraités que l'espèce humaine, peut-être aussi parce qu'ils se trouvent réunis en plus grand nombre. M. d'Abbadie rapporte à ce sujet qu'en Éthiopie un seul coup de foudre a tué 2,000 moutons. Très-souvent il arrive que le berger, le cavalier et le chasseur sont épargnés, tandis que les bestiaux, les chevaux et les chiens sont frappés (Boudin).

Paratonnerres. La foudre, quand elle tombe, frappe de préférence les édifices élevés et les arbres; elle suit tous les conducteurs métalliques qui se trouvent sur son passage pour se rendre dans le sol; on conçoit sur-le-champ qu'une longue barre de fer, terminée en pointe, élevée verticalement sur un édifice et communiquant avec de la terre humide, sans aucune solution de continuité, doit le protéger efficacement. Une semblable barre de fer convenablement disposée est appelée *paratonnerre;* l'idée première en est due à Franklin.

Dès l'instant qu'un nuage orageux passe au-dessus d'un paratonnerre et se trouve dans sa sphère d'activité, il agit sur son électricité naturelle, et, par son intermédiaire, sur celle de la terre;

l'électricité du nuage attire celle de nom contraire de l'électricité naturelle de la tige, et repousse l'autre dans le sol ; bientôt l'électricité accumulée sur la pointe acquiert une tension telle qu'elle s'en échappe pour reformer de l'électricité naturelle avec celle du nuage. La tension est souvent si grande que, dans l'obscurité, l'électricité s'échappe sous forme d'aigrette lumineuse.

L'action par influence est d'autant plus forte que les corps qui se trouvent à la surface du sol sont meilleurs conducteurs de l'électricité ; il suit de là que le nombre des paratonnerres élevés sur un édifice et leur hauteur doivent être en rapport avec le pouvoir conducteur des parties qui le composent.

En 1823, sur la demande du gouvernement, l'Académie des sciences invita la section de physique à rédiger une instruction spéciale sur les paratonnerres ; M. Gay-Lussac fut chargé du rapport au nom de la section ; les instructions qu'il renferme sont devenues un manuel populaire, servant de guide aux praticiens. Depuis lors, l'électricité s'étant enrichie de découvertes importantes et la nature des constructions ayant éprouvé des changements considérables, dans un grand nombre de cas, les métaux remplaçant le bois et la pierre, on sentait la nécessité de revoir les instructions de 1823, ou, au moins, d'y ajouter des articles complémentaires. L'Académie des sciences fut appelée à s'occuper de nouveau de cette question par la compagnie du palais de cristal. La section de physique fut chargée de préparer le travail, en le reprenant là où l'avait laissé M. Gay-Lussac ; M. Pouillet fut nommé rapporteur.

Entrons maintenant dans le détail des diverses parties d'un paratonnerre et sur son mode d'action, en prenant en considération les différents points qui ont été traités dans ces deux rapports.

L'expérience a prouvé que, toutes choses égales d'ailleurs, plus un paratonnerre est élevé dans l'air, plus il a d'efficacité. On ne sait pas encore au juste la distance à laquelle il étend son action latérale : l'expérience a appris seulement que les parties des édifices qui sont placées à une distance du paratonnerre de plus de trois à quatre fois sa longueur ont été foudroyées.

Charles a reconnu qu'un paratonnerre pouvait défendre efficacement autour de lui des atteintes de la foudre un espace circulaire d'un rayon double de sa hauteur. Cette règle, consignée dans l'instruction de 1823, a été adoptée dans la pratique pour les bâtiments en pierres et en bois que l'on arme d'un nombre de para-

tonnerres dépendant de leur longueur et de leur largeur; on peut, dans ce cas, se borner à faire communiquer deux paratonnerres avec le même conducteur. Mais quand il s'agit de bâtiments en fer, qui exercent sur les nuages orageux une action par influence beaucoup plus énergique que la première, l'expérience n'a pas encore fait connaître les distances préservées à partir du pied du paratonnere : on sait seulement que l'on évitera d'autant plus l'explosion qu'ils seront plus multipliés et en parfaite union avec un sol humide. Lorsque l'un des conducteurs offre quelque part des solutions de continuité, il arrive que la foudre, après l'avoir frappé, l'abandonne pour se porter sur un corps voisin, qui lui offre plus de facilité afin de se rendre ensuite dans le sol. Ce changement de conducteur est presque toujours accompagné d'explosion et de dégâts plus ou moins graves.

Pour parer à ce grave inconvénient, l'instruction de 1823 donne les conseils suivants : « Si les bâtiments que l'on arme d'un para-« tonnerre renferment des pièces métalliques un peu considérables, « comme des lames de plomb qui recouvrent le faîtage et les arêtes « du toit, des gouttières en métal, de longues pièces de fer pour « assurer la solidité du bâtiment, il sera nécessaire de les faire « toutes communiquer avec le conducteur du paratonnerre : mais « il suffira d'employer pour cet objet des barres de fer de 8 milli-« mètres de côté, ou du fil de fer d'un égal diamètre. »

La nature des matériaux qui composent un édifice est l'élément principal, nous le répétons, de l'action par influence exercée par un nuage orageux. Si ces matériaux sont en pierre ou en bois, cette action est très-faible; s'ils sont en fer, en plomb et en zinc, elle est au contraire très-intense. Dans les instructions de 1854, M. le rapporteur s'exprime comme il suit à cet égard : « Deux édi-« fices pareils pour la grandeur et la forme, étant situés sur le même « sol et disposés de la même manière par rapport à un nuage ora-« geux, l'un construit en pierres et en bois, d'après l'ancien sys-« tème, l'autre en pièces métalliques, d'après le nouveau, si les « paratonnerres manquent et que les conditions soient telles que « la foudre doive éclater, elle frappera toujours ce dernier, et ja-« mais le premier, celui-ci se trouvant protégé par son voisin, « dont les électricités naturelles sont influencées plus vivement. Il « arriverait là ce qui arrive quand on présente en même temps aux « conducteurs d'une machine électrique, à la même distance et de « la même manière, une boule de pierre ou de bois et une boule de

« métal; c'est toujours celle-ci qui reçoit l'étincelle dès qu'on l'ap-
« proche assez près pour qu'elle éclate. »

Les paratonnerres sont donc d'autant plus indispensables que les édifices contiennent de plus grandes superficies et de plus grandes masses de substances métalliques.

Fig. 110.

D'après les instructions de 1823, un paratonnerre est composé des parties suivantes : la tige AB est une barre de fer carrée ou ronde, amincie de sa base au sommet, en forme de pyramide. Pour une hauteur de 7 à 9 mètres, on lui donne à la base de 54 à 60 millimètres de côté. Le fer s'oxydant sous l'action de l'eau et de l'air, l'extrémité de la tige AB est terminée par une tige conique AC de 55 centimètres de longueur, en cuivre jaune, dorée à son extrémité, ou terminée par une petite aiguille de platine A*b*, de 5 centimètres de longueur. L'aiguille en platine est soudée à la soudure d'argent avec la tige de cuivre; dans la crainte qu'elle ne s'en sépare, on renforce l'ajustage par un petit manchon de cuivre jaune *ab*, comme le montre la figure. La tige de cuivre se réunit à la tige de fer au moyen d'un goujon qui entre à vis dans toutes les deux en C.

Une tige de cette dimension étant d'un transport difficile, on la coupe en deux parties AF, EB aux trois ou aux deux cinquièmes environ de sa longueur, à partir de sa base. La partie supérieure AD s'emboîte exactement par un tenon pyramidal DF de 19 à 20 centimètres dans la partie inférieure EB, et une goupille l'empêche de s'en séparer. Mais comme, à la longue, la rouille peut établir une solution de continuité, il est convenable de souder à l'étain tous les joints.

Au bas de la tige, à 8 centimètres du toit, on place une embase destinée à rejeter l'eau de pluie qui, coulant le long de la tige, pourrirait immédiatement les bois du toit. Au-dessus de l'embase, la tige est arrondie sur une étendue d'environ 5 centimètres, pour recevoir un collier brisé à charnières, portant deux oreilles entre lesquelles on serre l'extrémité du conducteur du paratonnerre au moyen d'un boulon: le plan du collier est indiqué en P; au lieu du collier, on peut faire un étrier carré qui embrasse étroitement la tige.

Si la tige du paratonnerre doit être posée au-dessus de la toiture d'une ferme, on perce le faîtage d'un trou rond ou carré de même dimension que le pied de la tige, et par-dessus et en-dessous on fixe avec le boulon ou avec deux étriers boulonnés, qui embrassent et serrent le faîtage, deux plaques de fer de 2 centimètres d'épaisseur, percées d'un trou semblable à celui qui est fait dans le bois. La tige s'appuie par une petite rondelle sur la plaque supérieure, contre laquelle on la presse fortement au moyen d'un écrou se vissant en dessous à l'extrémité de la tige contre la plaque inférieure.

Dans le cas où le paratonnerre doit être placé sur une voûte, on le termine par trois ou quatre empâtements qu'on scelle dans la pierre avec du plomb.

Le conducteur qu'on adapte au paratonnerre est une barre de fer de 13 à 20 millimètres en carré. On la réunit solidement à la tige en la pressant entre les deux oreilles du collier P au moyen d'un boulon, ou bien on la termine par une fourchette qui embrasse la queue de l'étrier, et l'on boulonne les deux pièces ensemble. Ce conducteur est formé de plusieurs barres réunies bout à bout. Quand le conducteur a été replié sur la corniche du bâtiment, sans la toucher, on l'applique contre le mur, le long duquel il doit descendre dans le sol, en le fixant au moyen de crampons que l'on scelle dans la pierre. Quand il est arrivé dans le sol, à 50 ou 55 centimètres au-dessous de sa surface, on le recourbe perpendiculairement au mur, et on le plonge dans cette nouvelle direction de 4 ou 5 mètres, puis on l'enfonce dans un puits, ou dans un trou de 4 à 5 mètres, si l'on ne rencontre pas d'eau; car, si l'on en rencontre, on ne l'enfonce pas autant. Pour préserver de la rouille le fer qui s'enfonce dans le sol, on fait courir le conducteur dans un auget rempli de charbon; on se sert à cet effet de braise de boulanger, qui, outre l'avantage de préserver le fer de l'oxydation, a celui de conduire mieux l'électricité que le charbon ordinaire. Il ne suffit pas que le conducteur soit mis en communication avec un puisard, ou une citerne, il faut encore s'assurer que ce puisard est en communication avec une grande nappe d'eau souterraine, sans quoi l'efficacité du paratonnerre serait nulle.

L'expérience a prouvé que le fer, ainsi enveloppé de braise, n'éprouve aucune altération dans l'espace de trente années. Ce conducteur doit être plongé de 65 centimètres au moins dans l'eau, lorsqu'elle est le plus bas possible. Son extrémité inférieure est ter-

minée ordinairement par deux ou trois racines, pour faciliter l'écoulement de l'électricité dans le terrain environnant.

Quand on veut faire passer le conducteur dans un terrain sec et mauvais conducteur, tel que le roc, on donne à la tranchée qui doit le recevoir une longueur au moins double de celle qui a été indiquée pour un terrain ordinaire; si cela n'est pas possible, on en fait d'autres transversales dans lesquelles on place de petites barres de fer entourées de braise, que l'on met en communication avec le conducteur : celui-ci doit toujours s'enfoncer dans un trou, s'y diviser en plusieurs racines et être recouvert de toutes parts de braise. Ces précautions sont de nul effet s'il n'y a pas de nappes d'eau.

Les barres de fer ne pouvant, à cause de leur rigidité, suivre sans quelques difficultés les contours du bâtiment, on les remplace par des cordons métalliques qui ont l'avantage, sur les barres, de ne point avoir de raccords, ce qui diminue, par conséquent, les chances de solution de continuité. Ces cordes, qui sont formées de quinze fils de fer tordu, ont ordinairement un diamètre de 16 à 18 millimètres. Pour les préserver de l'action de l'air, chaque fil est goudronné séparément, puis la corde entière. Celle-ci est attachée à la tige du paratonnerre de manière à éviter les solutions de continuité, à l'aide d'une soudure forte; sans quoi il pourrait se faire que quelques fils seulement livrassent passage à l'électricité, et alors ces fils seraient fondus, comme on en observe de nombreux exemples surtout sur mer. On a reconnu, par expérience, que de semblables cordes n'éprouvaient pas d'altération dans l'espace de trente ans; cependant, quand on le peut, il vaut encore mieux employer des barres, qui sont beaucoup moins destructibles.

Il résulte de ce que nous venons de dire, que la construction du paratonnerre et de ses conducteurs repose sur les principes suivants :

1° Ils doivent avoir partout une section suffisante;

2° Ils doivent être continus et sans lacune, depuis la pointe de la tige jusqu'à la partie humide du sol.

Il faut bien s'entendre d'abord sur la continuité : elle peut s'opérer par juxtaposition, en boulonnant les pièces; ou par une soudure forte; dans le premier cas, les surfaces de contact peuvent s'oxyder, les intervalles se remplissent de corps étrangers; la conductibilité électrique se trouvera donc altérée avec le temps. Dans le deuxième cas, on n'aura rien à craindre de semblable. L'instruction de 1823 n'a pas été aussi explicite à cet égard que celle de 1854, qui a adopté les règles pratiques suivantes :

Première règle. Réduire autant que possible le nombre des joints sur la longueur entière du paratonnerre, depuis la pointe jusqu'au réservoir commun.

Deuxième règle. Faire au moyen de la soudure à l'étain tous ceux de ces joints qu'il est nécessaire de faire sur place, soit à cause de la forme, soit à cause de la longueur des pièces.

Ces soudures à l'étain, qui devront toujours se faire sur les surfaces ayant au moins 10 centimètres carrés, seront en outre consolidées par des vis, des boulons ou des manchons.

Ces précautions doivent être prises particulièrement quand il s'agit d'édifices dans lesquels il entre beaucoup de pièces de métal, ou qui sont placés sur un sol vaste et bon conducteur, ou qu'il s'agit de vaisseaux.

Troisième règle. Modifier le sommet de la tige du paratonnerre, tel qu'il a été indiqué plus haut et conformément à ce qui sera dit ci-après, car il arrive quelquefois que l'extrémité est fondue et courbée, ce qui fait perdre au paratonnerre une partie de sa propriété préventive.

La section de physique, pour parer à certains inconvénients, avait d'abord émis l'opinion suivante : l'extrémité supérieure du fer ne doit pas avoir moins de 3 centimètres carrés de section, par conséquent 2 centimètres de diamètre; on y fera, à la lime et dans l'axe, un cylindre ayant 1 centimètre de diamètre et 1 centimètre de hauteur, qui sera ensuite taraudé; sur cette vis saillante on adaptera un cône de platine de 2 centimètres de diamètre à la base et d'une hauteur double, c'est-à-dire de 4 centimètres, l'angle d'ouverture à la pointe aiguë étant ainsi de 28 à 30 degrés; ce cône de platine, d'abord plein, sera creusé et taraudé pour faire écrou sur la vis, ensuite il sera soigneusement soudé au fer à la soudure forte, pour composer avec lui un tout continu et sans vides.

En substituant à la pointe aiguë et très-effilée qui a terminé jusqu'ici les paratonnerres la pointe aiguë d'un angle de 30°, on perd, à la vérité, une partie de l'action par influence exercée par un nuage orageux quand les distances sont petites et les intensités faibles, mais on gagne considérablement à la résistance incomparablement plus grande qu'elle oppose à la fusion ou à l'action physique de la foudre.

L'Académie des sciences, qui avait conseillé d'abord, et avec quelque raison, de terminer le paratonnerre par un cône en platine, est revenue sur sa décision, et s'est bornée à recommander comme

l'avait dit aussi la commission de 1823 de faire la pointe du paratonnerre en cuivre rouge ; la commission de 1854, en lui proposant ce changement, ne s'est pas dissimulé les altérations que le cuivre rouge éprouve de la part des influences atmosphériques ; mais elle a pensé que ces inconvénients sont compensés par les avantages suivants :

1° Le cuivre rouge, tel qu'on le trouve dans le commerce, est rangé avec l'or et l'argent parmi les meilleurs conducteurs de la chaleur et de l'électricité ; la pointe du cône de ce métal s'échauffera donc beaucoup moins que celle du cône de platine sous l'influence des courants électriques et même des coups de foudre ; ainsi, avec la forme qu'on donne (le cylindre aura 2 centimètres de diamètre, 20 centimètres de longueur, et sera terminé en haut par un cône de 3 à 4 centimètres de hauteur), il est très-probable qu'elle ne sera ni fondue, ni profondément oxydée.

2° Le paratonnerre à pointe de cuivre rouge n'entraîne qu'à une moindre dépense ; il devient accessible, non-seulement aux communes mais encore à la plupart des propriétaires ; il peut être fabriqué partout, car il y a sans doute en France bien peu de villages où l'on ne trouve un ouvrier capable de travailler et d'ajuster toutes les pièces d'un paratonnerre d'après ce système.

Quoi qu'il en soit de ces deux décisions, nous en appelons à l'expérience pour savoir lequel des deux systèmes doit être préféré.

Il ne reste plus maintenant qu'à examiner la question relative à la hauteur à donner aux paratonnerres et à leur nombre, c'est-à-dire aux cercles de protection qu'ils peuvent exercer.

Dans l'instruction de 1823 se trouvent énoncés les principes suivants :

La hauteur des tiges des paratonnerres varie avec les bâtiments sur lesquels on les élève : les dômes et les clochers, par exemple, dominant de beaucoup les objets voisins, on n'a pas besoin, pour les protéger, de leur donner la même longueur que pour les édifices terminés par un toit très-étendu ; aussi n'emploie-t-on que des tiges minces s'élevant de 1 à 2 mètres au-dessus des croix qui les terminent. On peut, si l'on veut, se contenter de ces croix en établissant une communication très-intime entre elles, le sol et la nappe humide.

La prudence recommande, quand il s'agit de garantir des magasins à poudre, de placer les tiges de paratonnerres à peu de distance : on évite par là les effets qui pourraient résulter des solutions de continuité. Pour un vaisseau, la tige du paratonnerre se compose

seulement de la partie en cuivre AC (figure 110, page 426) ; cette tige est vissée sur une verge de fer ronde qui entre dans l'extrémité de la flèche du mât de perroquet. Une barre de fer liée au pied de la verge descend le long de la flèche, et se termine par un crochet ou anneau auquel s'attache le conducteur du paratonnerre, qui est ici une corde métallique ; celle-ci est maintenue de distance en distance à un cordage, et, après avoir passé dans un anneau fixé au porte-hauban, se réunit à une barre ou plaque de métal qui communique avec le doublage en cuivre du vaisseau. Les vaisseaux étant plus sujets à être foudroyés que les objets terrestres, à raison de la conductibilité de l'eau de mer qui détermine une action par influence très-énergique, on ne saurait prendre trop de précautions pour établir une parfaite communication entre toutes les parties métalliques ; il ne faut pas craindre, dans ce cas, de multiplier les soudures.

Lorsqu'on place un ou plusieurs paratonnerres sur un édifice, il faut avoir l'attention de les faire communiquer ensemble et avec un conducteur commun situé à égale distance de chaque tige. Pour trois paratonnerres, il est prudent de leur donner deux conducteurs. En général, il faut prendre un conducteur particulier pour chaque paire de paratonnerres, et établir une communication intime entre les pieds de toutes les tiges.

Ces règles ne sont pas invariables, tant s'en faut. L'instruction de 1854 reconnaît, par exemple, que les rayons du cercle de protection doit varier avec la nature des matériaux qui constituent la couverture ou comble de l'édifice. Ainsi, il ne doit pas être aussi grand quand cette couverture est en métal que lorsqu'elle est en bois, en tuiles ou en ardoise. Dans ce dernier cas effectivement, la portion active du nuage orageux, quoique notablement plus éloignée du paratonnerre que de la couverture, exerce cependant sur le paratonnerre une action plus vive, tandis que, dans le premier cas, ces deux actions doivent être à peu près égales pour une distance égale.

Quant à la hauteur à donner au paratonnerre, la commission s'exprime comme il suit à l'égard des bâtiments de mer et des bâtiments en fer tels que le palais de l'Industrie établi aux Champs-Élysées.

Bâtiments de mer. « Le cuivre rouge a une grande supériorité sur le fer et le laiton dont on fait usage trop souvent pour composer le câble qui forme le conducteur du paratonnerre ; il est moins al-

térable sous l'influence des agents atmosphériques, et surtout il peut être employé avec une section trois fois plus petite. Nous conseillons donc exclusivement les câbles de cuivre rouge; ils devront avoir 1 centimètre carré de section métallique; ainsi leur poids sera d'environ 900 grammes par mètre courant, ou 90 kilogrammes les 100 mètres; les fils auront de 1 millimètre à $1^{mm},5$ de diamètre; ils pourront être cordés à trois torons, comme à l'ordinaire.

« Le paratonnerre peut n'avoir que quelques décimètres de longueur, y compris sa pointe, composée comme nous l'avons dit. Sa jonction avec le câble sera faite dans l'atelier, à la soudure à l'étain; pour cela on pourra, par exemple dans la tige, ménager un trou convenable, et ramener le bout de 3 à 4 décimètres de longueur pour le corder et l'arrêter avec le reste; ensuite le trou sera rempli d'une soudure qui imprègne tous les fils et qui forme aux points d'entrée et de sortie du câble une sorte de large hémisphère.

« Avec cette disposition, le paratonnerre ne peut plus se visser lui-même au sommet de la flèche qui le reçoit; il faudra donc lui donner une forme qui permette de le boulonner solidement avec son support.

« A son extrémité inférieure, le câble sera ajusté d'une manière analogue dans une pièce de cuivre de forme convenable, et il faudra nécessairement que cette pièce de cuivre soit mise elle-même en permanente communication avec le doublage du navire.

« La précaution dont on use quelquefois d'isoler la chaîne du porte-hauban est inutile, et l'habitude de jeter la chaîne à la mer au moment de l'orage est dangereuse : 1° en ce qu'il est possible que l'on oublie de le faire; 2° en ce que souvent il ne suffit pas que la chaîne communique à l'eau de la mer par 2 ou 3 décimètres carrés de surface. »

Palais de l'Industrie. La commission a cru devoir présenter les observations suivantes, qui s'appliquent à toutes les constructions du même genre: « Les constructions du palais de l'Industrie couvrent un rectangle de 100 mètres de largeur sur 250 mètres de longueur, sans compter les pavillons qui se trouvent en dehors et sur les quatre faces. La galerie centrale a 25 mètres de largeur, et la galerie rectangulaire qui lui est contiguë et qui l'enveloppe de toutes parts, seulement 28 mètres. Les fermes de cette grande charpente de fer sont à 8 mètres l'une de l'autre; elles sont reliées entre elles par des pannes en forme de cornières, par des moises et des entretoises, et ce vaste ensemble est supporté par plusieurs

centaines de colonnes de fonte, indépendamment du mur extérieur.

« Ce système de construction ne permet pas que les paratonnerres aient plus de 6 à 7 mètres de hauteur, et qu'ils soient posés ailleurs que sur les sommets des fermes. En conséquence on les établira de trois en trois fermes, c'est-à-dire à 24 mètres l'un de l'autre. Ainsi, la galerie rectangulaire aura trente paratonnerres, la galerie centrale neuf ou dix; quant aux pavillons, ils en recevront plus ou moins, suivant leur étendue et leur position.

« Un grand conducteur commun sera établi dans toute la longueur du chéneau qui fait le tour de la galerie centrale, ayant ainsi 500 mètres de développement; il sera formé avec du fer portant 8 ou 9 centimètres carrés de section et métalliquement continu. Chaque paratonnerre sera muni d'un conducteur particulier qui viendra se souder au conducteur commun. Enfin le conducteur commun lui-même sera mis en communication avec le sol au moyen de quatre puits, au moins, qui seront creusés vers les quatre angles du rectangle ou vers les milieux des côtés, et qui devront être assez profonds pour avoir toujours 1 mètre d'eau. Il importe que ces puits soient éloignés les uns des autres; il importe pareillement que les conducteurs qui viennent y perdre la foudre se trouvent en contact avec le liquide par de grandes surfaces, soit qu'on les y ramifie de diverses manières, soit que l'on y soude des feuilles larges et épaisses de tôle étamée, de zinc ou de cuivre.

« Les paratonnerres des pavillons seront de même reliés au conducteur commun, au plus voisin de ses embranchements qui se dirigent vers les puits.

« On doit remarquer qu'il se trouve environ 40 mètres de distance entre les pieds des paratonnerres correspondants de la galerie centrale et de la galerie rectangulaire, tandis que, d'après les règles reçues par rapport au cercle de protection, les paratonnerres de 7 mètres ne comporteraient qu'une distance de 28 mètres. Mais ces conditions sont imposées par la nature de la construction, qui ne permet, comme nous l'avons dit, de placer des paratonnerres qu'au sommet des fermes; au reste, il nous paraît que cet excès de distance ne peut avoir grand péril, puisqu'à partir du pied des paratonnerres, la couverture ayant la forme d'un cylindre horizontal à base circulaire va s'abaissant rapidement.

CHAPITRE IV.

Phénomènes dont l'origine est rapportée à l'électricité atmosphérique.

De la grêle. La grêle, sa formation et sa chute, ayant été considérés comme un phénomène électrique par plusieurs physiciens, entre autres par Volta, nous devons par conséquent exposer ici la théorie qu'en a donnée l'illustre auteur de la pile, avec la modification qu'y a faite Peltier; mais, pour bien la comprendre et en discuter la valeur, il est indispensable de décrire le phénomène.

La chute de la grêle est toujours précédée d'un bruissement particulier dans les airs, que l'on compare à celui que fait entendre un sac de noix que l'on agite fortement; elle est en outre toujours accompagnée d'effets électriques, comme la pluie, la neige et le grésil : le tonnerre se fait entendre quelquefois avant le bruit précurseur, de même que pendant la chute. Il semblerait donc que l'électricité intervient d'une manière quelconque dans la production du phénomène; mais, comme de pareils effets se produisent dans les pluies d'orage, on ne peut en conclure que la grêle ait uniquement une origine électrique.

Sous les tropiques, la grêle est fort rare; à Cumana, elle est inconnue; mais à 500 ou 600 mètres au-dessus du niveau de la mer, elle devient plus commune. Dans nos climats elle est, comme on le sait, assez fréquente.

D'après les relevés faits par M. Kæmtz sur les grêles tombées en Allemagne et en Suisse, il en résulte que c'est vers deux heures de l'après-midi, ou au moment de la plus forte chaleur du jour, que la grêle tombe le plus fréquemment, et particulièrement au printemps et en été.

La grêle précède les pluies d'orage et les accompagne quelquefois, mais rarement elle les suit. Les nuages qui déversent la grêle sont ordinairement très-épais et ont une nuance cendrée qui leur est propre; leurs bords sont échancrés, et leurs surfaces sont rem-

plies çà et là de protubérances très-irrégulières : on a remarqué qu'ils sont en général peu élevés.

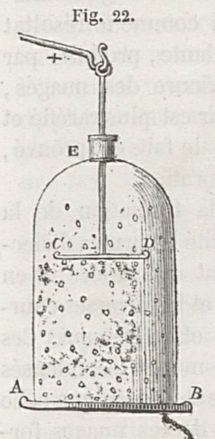
Un grêlon est ordinairement formé de plusieurs couches distinctes de glace transparente autour d'un noyau blanc et opaque, qui n'est autre qu'un flocon de neige; quelquefois les couches concentriques sont alternativement diaphanes et opaques. La grosseur de chaque grain est très-variable : on en voit de la grosseur d'une noix et quelquefois de plus gros. On a vu des grêlons du poids de 100, 200 et 300 grammes. Comment concevoir que des morceaux solides de glace aussi pesants, dont l'ensemble compose ces nuages couleur de cendre qui annoncent la grêle puissent se développer, se soutenir en l'air, ou rester immobiles dans l'amas de nuages obscurs qui couvrent une partie du ciel ?

Volta a essayé de rendre compte de ces différents effets, tout en ne se dissimulant pas les difficultés que nous venons de signaler. Commençons par expliquer, suivant lui, le froid qui congèle l'eau, et la cause en vertu de laquelle un grêlon, qui a déjà acquis une certaine masse, reste suspendu dans l'air assez longtemps pour arriver à un volume qui va quelquefois jusqu'à trois décimètres de circonférence. Le froid excessif qui parvient à congeler les molécules aqueuses en été, au milieu du jour, dans une région inférieure à celle des neiges, a été considéré par lui comme le résultat d'une évaporation extrêmement rapide et abondante, produite par les rayons du soleil qui frappent la partie supérieure des nuages, évaporation qui est d'autant plus rapide que l'air est plus raréfié et plus électrisé, en admettant, comme du reste le fait est prouvé, que l'électricité favorise à un haut degré l'évaporation.

Cela posé, voici comment Volta explique la formation de la grêle : les nuages orageux possédant une quantité énorme d'électricité, leurs parties extérieures sont fortement repoussées; il en résulte une grande irrégularité dans leurs bords et les diverses courbures de leurs surfaces, comme cela existe effectivement. Ces nuages sont accompagnés quelquefois de petits nuages, condensés dans la partie inférieure seulement qui est moins électrisée que celle qui est au-dessus. Supposons, dit Volta, qu'un de ces nuages fortement électrisés soit congelé presque subitement à la face supérieure par suite d'une très-grande évaporation; il en résultera alors une multitude de petits glaçons qui seront les noyaux des grains de grêle. Ces noyaux, rejetés en haut par la force de répulsion électrique du nuage, seront tenus en suspension à une certaine dis-

tance, de la même manière qu'un flocon de coton ou de tout autre corpuscule léger est tenu suspendu en l'air au moyen d'un tube de verre électrisé qu'on place au-dessous. C'est ainsi que, si l'on met des corps légers sur un large plateau isolé et horizontal, on peut, en l'électrisant fortement, les voir s'élever dans l'air et s'y soutenir aussi longtemps que le plateau reste électrisé : si cette comparaison est exacte, il faut que les grains de grêle exécutent, à mesure qu'ils deviennent plus gros, les mêmes mouvements que les corpuscules légers soumis à l'action du plateau électrisé. Ces grains oscillent donc au-dessus du nuage fortement électrisé, et tombent successivement en vertu de leur propre poids, quand ils ont perdu leur électricité; ils arrivent alors à la partie électrisée du nuage, où ils prennent de l'électricité et sont chassés de nouveau; ceux qui ne peuvent surmonter l'action de la pesanteur, tombent à terre. Ce seraient ces grains rares et solitaires qui s'échappent çà et là, et précèdent la grêle abondante qui va bientôt tomber. Le mouvement et la suspension des autres grains qui voltigent au-dessus du nuage, diminuent à mesure que leur masse individuelle s'accroît par l'adjonction de couches d'eau glacée et que la force de l'électricité diminue ; il arrive enfin un instant où, entraînés par leur propre poids, ils tombent en abondance sur la terre.

Fig. 22.



Volta, pour compléter son explication, a supposé l'existence de deux ou plusieurs nuages l'un au-dessus de l'autre, électrisés contrairement. On peut se représenter ainsi les grains de grêle non-seulement comme suspendus et flottants, mais encore comme se trouvant dans une vive agitation, poussés et repoussés de la couche du nuage électrisé positivement à celle du nuage électrisé négativement, comme le sont les balles de sureau dans la danse des pantins. On sait en effet que le plateau CD isolé à l'intérieur d'une cloche AE, étant électrisé à l'aide d'une machine, attire et repousse alternativement les petites balles de sureau que l'on place sur le plateau AB en cuivre qui communique au sol. Quant au bruissement qu'on entend à l'instant où la grêle tombe, Volta l'attribue au choc des grêlons les uns contre les autres, lorsqu'ils sont ballottés d'un nuage à l'autre.

On a fait à cette théorie des objections sérieuses : comment se fait-il que deux nuages électrisés différemment ne sont pas ramenés immédiatement à l'état neutre, quand il existe un si grand nombre de petits conducteurs qui établissent continuellement la communication entre eux? On ne conçoit pas non plus comment des glaçons pesant 250 grammes peuvent être renvoyés d'un nuage à l'autre comme des corps légers, car les vésicules des nuages, qui sont moins pesantes que les grêlons, devraient, à plus forte raison, obéir à l'action attractive et mélanger ces masses nuageuses; mais, en supposant même que l'électricité recelée par les nuages orageux soit considérable et qu'un semblable ballottage eût lieu, alors on devrait apercevoir un feu continu d'étincelles, ce qui n'a jamais été observé. En outre, le ballottement des grêlons ne peut avoir lieu comme dans la danse des pantins : les plaques métalliques électrisées, entre lesquelles oscillent les balles de sureau, ne se laissent pas pénétrer comme les nuages. Or, si l'on substitue à la plaque inférieure une nappe d'eau, cette danse n'a plus lieu; les balles, en descendant, pénètrent dans le liquide et ne se relèvent plus; les nuages doivent se comporter de même. Il est impossible enfin d'admettre la congélation des nuages par l'action seule des rayons solaires, attendu que le rayonnement solaire ou toute autre cause calorifique ne peut hâter l'évaporation d'un liquide quelconque sans amener son échauffement.

Peltier, prenant en considération quelques-unes des objections précédentes, a modifié comme il suit la théorie de Volta : quand deux nuages chargés d'électricité différente sont placés l'un au-dessus de l'autre, l'attraction est alors considérable; les nuages se rapprochent sans décharge notable d'électricité, seulement il y a des actions par influence analogues à celles qui ont lieu entre les corps rugueux ou couverts d'aspérités. Cet échange d'électricité ne peut s'opérer sans produire une vaporisation de l'eau, d'où résulte un abaissement de température qui est d'autant plus prompt que la tension électrique est plus grande. Quand la température des nuages est assez élevée, il n'y a aucun effet particulier; mais si l'un d'eux est à une température voisine de zéro, l'abaissement de température, résultant de l'évaporation, pourra produire la congélation des portions non vaporisées qui se transforment alors en flocons de neige. Chaque flocon, chaque parcelle de neige, chargé d'électricité et d'humidité prise au premier nuage, est attiré par le second et emporté par lui. Pendant cette excursion, il y a perte d'é-

lectricité par rayonnement, puis évaporation d'une partie de la couche humide, d'où résulte un abaissement de température, et par suite solidification de la portion restée liquide autour du globe neigeux. La tension électrique étant diminuée par cette influence, le globule est moins attiré, tombe dans le premier nuage, s'y décharge, s'y mouille, et ainsi de suite jusqu'à ce que les grêlons aient acquis assez de densité pour tomber vers la terre.

Suivant cette hypothèse, le bruit qui accompagne le phénomène de la grêle n'est pas dû au choc des grêlons, mais aux décharges électriques; le choc seulement pourrait l'augmenter. Le rayonnement électrique, ainsi que l'évaporation de l'humidité des grêlons, contribue à donner des formes anguleuses aux grains. Il faut donc, pour qu'il y ait formation de grêle, deux nuages chargés d'électricités contraires, dont les particules vésiculaires possèdent une grande tension électrique et ne cèdent que lentement leur électricité à la périphérie. La température ne doit pas être de beaucoup supérieure à zéro, et les échanges électriques doivent produire une rapide évaporation.

Cette théorie rentre dans celle de Volta, sauf la cause du refroidissement des nuages, qui paraît assez rationnelle; mais les autres objections s'y appliquent.

On a proposé, pour éviter les dégâts de la foudre et de la grêle, de soutirer l'électricité des nuages à l'aide de conducteurs fixes élevés dans l'atmosphère par différents moyens, et agissant comme d'immenses paratonnerres pour décharger continuellement l'électricité des nuages; mais leur action serait beaucoup trop minime, car il ne serait pas possible de multiplier assez leur nombre pour atteindre ce but; aussi l'expérience n'a-t-elle nullement sanctionné jusqu'ici ces tentatives.

Des trombes. Les trombes sont des amas de vapeurs épaisses, animées ordinairement d'un mouvement rapide de rotation et de translation, ayant la plupart du temps la forme d'un cône dont la base est dirigée le plus souvent vers les nuages, le sommet vers la terre, et quelquefois dans une position inverse. Ces amas font entendre un bruit assez semblable à celui d'une charrette courant sur un chemin rocailleux.

Ces météores déracinent les arbres, les dépouillent de leurs feuilles, les foudroient, les clivent et les transportent à de grandes distances; ils renversent les maisons, enlèvent leur toiture, les carreaux et même les pavés, détruisent ou brisent tout ce qui se

trouve sur leur passage; souvent ils déversent de la pluie et de la grêle; souvent aussi ils sont accompagnés de globes de feu, lancent des éclairs, font entendre le bruit du tonnerre, et se dissipent assez ordinairement après.

Les trombes s'observent aussi bien sur mer que sur terre; nous donnons ici deux dessins de trombes de mer. La figure 20, planche 1, montre une trombe dans ses trois phases : au moment où elle commence, quand elle exerce son action, et quand elle finit. La figure 21 représente une trombe observée par le capitaine Becchey, qui avait trois cônes sortant du même pavillon, lesquels se réunirent bientôt pour se diviser ensuite.

Les physiciens sont partagés d'opinion sur leur origine : les uns leur accordent une origine électrique, les autres les considèrent comme dus exclusivement à des courants d'air; nous ne parlerons ici que de la théorie électrique.

Brisson paraît avoir eu l'idée le premier de rapporter les trombes à l'électricité, en ayant égard aux effets puissants d'attraction et de répulsion exercés par cet agent. On conçoit en effet que si un nuage électrique vient à s'approcher assez près de l'eau pour que sa puissante tension agisse par influence sur ce liquide, alors celui-ci peut être soulevé. Peltier a repris cette hypothèse et a fait quelques expériences qui sont de nature à la faire prendre en considération.

On peut, suivant lui, reproduire les effets des trombes en supposant que le nuage soit représenté par un globe constamment électrisé et couvert de pointes, et mettant dans sa sphère d'activité des vapeurs, des poussières et de l'eau; avec l'eau, la dépression du liquide a lieu; avec les poussières, on a des courants directs du centre à la circonférence, se transformant en mouvements giratoires. Tous ces effets disparaissent en remplaçant le globe armé de pointes par un globe poli : au lieu de la dépression du liquide, on obtient une protubérance; l'attraction devenant plus considérable, l'eau s'élève en masse, et l'accélération de la vaporisation augmente. Peltier a obtenu les divers mouvements de la trombe en plaçant entre un plateau de cuivre inférieur non isolé et une sphère supérieure électrisée, des corps légers de formes variées.

L'attraction d'un nuage électrique est accompagnée, comme on l'observe dans les trombes, du refoulement de l'air vers ce nuage, d'où résultent des courants cheminant de l'extérieur à l'intérieur, et partant de tous les points de la circonférence; d'une projection

de vapeur d'eau, d'eau liquide, de corps légers ou pesants, enlevés ou arrachés à la terre, suivant la puissance de l'attraction. On suit sur mer comme sur terre la marche de cette puissance attractive. L'attraction des nuages est prouvée encore par une accélération prodigieuse dans l'évaporation des eaux et par l'abaissement de température, effets que l'on obtient facilement avec l'électricité.

On peut concevoir la production d'un cône nuageux en contact avec la terre, comme étant déterminée par deux causes : d'abord les nuages électrisés, exerçant une action par influence sur le sol, provoquent naturellement une attraction de la part de ce dernier; les nuages obéissent alors à cette attraction et s'approchent d'une quantité dépendante du pouvoir attractif et de leur densité. D'un autre côté, lorsque des nuages supérieurs, ayant la même électricité que les nuages inférieurs, viennent agir sur ceux-ci par répulsion, les nuages placés au-dessous étant repoussés peuvent approcher de la terre suffisamment pour s'y décharger sans explosion, par l'intermédiaire d'autres nuages qui touchent le sol et servent de conducteurs.

On arrive, en un mot, à considérer la trombe comme un conducteur imparfait entre les nuages orageux et la terre, lequel conducteur produirait tous les effets que l'on observe. Quant au bruit qui accompagne le météore, on peut l'attribuer à une multitude de petites décharges partielles, dont l'intensité varierait avec la conductibilité des substances. Ce bruit serait plus fort à l'extrémité des trombes qui traversent les montagnes, à cause des poussières et des terres meubles qui serviraient de corps intermédiaires; il perdrait de son intensité au-dessus de la mer, en raison de la meilleure conductibilité des particules aqueuses et de leur égale distribution.

Peltier a cherché à expliquer tous les effets si variés et si extraordinaires des trombes en invoquant seulement l'action exercée par un nuage électrisé sur tous les corps qui se trouvent sur le sol; c'est ainsi qu'il a expliqué l'évaporation successive de l'eau des mares, et même la disparition de la masse entière, quand les tensions électriques sont suffisantes; dans ce cas, ces masses sont enlevées, comme les arbres et les autres corps qui se trouvent à la surface de la terre.

Nous nous arrêtons, dans la crainte de donner trop d'extension à cet exposé, en nous bornant à dire que, bien qu'on ait cherché à considérer les trombes comme produites par des courants d'air,

et analogues aux ouragans et aux tornados (Théorie de M. Espy), on a été trop exclusif dans l'une et l'autre manière d'envisager le phénomène, car les deux causes invoquées doivent jouer un rôle dans la production des trombes. Si l'on doit invoquer, d'une part, l'intervention des courants d'air, on ne peut s'empêcher de croire que la cause déterminante des trombes proprement dites ne soit l'électricité, quand on voit surtout celle-ci reproduire tous les effets du météore.

Aurore polaire. L'aurore polaire est cette lueur formée par des rayons diversement colorés qui jaillissent de toutes les parties de l'horizon à certaines époques, dans l'hémisphère nord ou dans l'hémisphère sud; quand on l'observe dans nos climats, elle porte le nom d'*aurore boréale*. L'apparition de ce phénomène est annoncée par des perturbations exercées sur l'aiguille aimantée et dont nous parlerons dans le magnétisme terrestre; ces perturbations établissent une liaison intime entre ce phénomène et la distribution du magnétisme sur le globe, et nous laissent entrevoir qu'il a probablement une origine électrique.

L'aurore boréale, dans nos contrées, a en général l'apparence d'un brouillard assez obscur vers le nord, avec un peu plus de clarté vers l'ouest que dans le reste du ciel. Ce brouillard prend peu à peu la forme d'un segment de cercle, s'appuyant de chaque côté sur l'horizon; la partie visible de la circonférence, c'est-à-dire la partie supérieure, est bientôt entourée d'une lumière blanche donnant naissance à un ou plusieurs arcs lumineux; viennent ensuite des jets et des rayons de lumière diversement colorés, partant du segment obscur, dans lequel il se fait parfois quelques brèches éclairées semblant annoncer un mouvement de fluctuation dans la masse. Quand l'aurore s'est étendue, il se forme une couronne au zénith, où concourent les rayons lumineux. Le phénomène diminue alors d'intensité; on observe cependant encore de temps à autre des jets de lumière, une couronne et des couleurs plus ou moins vives, tantôt d'un côté du ciel, tantôt de l'autre. Enfin le mouvement cesse, la lueur se rapproche de plus en plus de l'horizon, la nue quitte les diverses parties du ciel et s'arrête vers le nord. Le segment obscur en se dissipant devient lumineux; sa clarté est d'abord assez prononcée près de l'horizon, plus faible au-dessus, et finit par se perdre dans le ciel.

L'aurore affecte encore d'autres formes; ainsi Mairan a observé, le 19 octobre 1726, à Breuille-Pont, une aurore composée d'un seul

segment obscur (planche 2, figure 22) percé symétriquement, autour de son bord, de créneaux à travers lesquels on croyait apercevoir un incendie.

Dans le Nord, ce phénomène est plus fréquent et se présente sous un autre aspect et avec plus d'éclat. Le lecteur pourra en juger par la description suivante d'aurores boréales observées à Bossekop (West-Finmark), dans la baie d'Alten (70° de latitude nord) pendant l'hiver de 1838 à 1839, par la commission scientifique envoyée dans le Nord.

Du 7 septembre 1838 au mois d'avril 1839, dans l'intervalle de 206 jours, on a compté 143 aurores boréales, qui ont été surtout très-fréquentes du 17 octobre au 25 janvier, pendant l'absence du soleil; de sorte que dans cette nuit de 70 fois 24 heures on a observé 64 aurores, sans compter celles dérobées à la vue par un ciel entièrement couvert, et dont néanmoins la présence était accusée par la perturbation des mouvements de l'aiguille aimantée.

Voici les principales phases des aurores boréales dans le Nord : le soir entre quatre et huit heures, la brume légère qui règne presque habituellement au nord de Bossekop, à la hauteur de 4 à 6°, se colore à sa partie supérieure, ou plutôt se frange des lueurs de l'aurore qui existe derrière ; cette bordure devient plus régulière et forme un arc vague, d'une couleur jaune pâle, dont les bords sont dessus et dont les extrémités s'appuient sur la terre. Cet arc monte plus ou moins lentement, son sommet restant dans le méridien magnétique, ou à très-peu près.

Bientôt des stries noirâtres séparent régulièrement la matière lumineuse de l'arc ; les rayons sont formés ; ils s'allongent, se raccourcissent lentement ou instantanément ; ils dardent, augmentant et diminuant subitement d'éclat. La partie inférieure, les pieds des rayons offrent toujours la lumière la plus vive et forment un arc plus ou moins régulier. La longueur de ces rayons est souvent très-variée, mais tous convergent vers un même point du ciel indiqué par le prolongement de la pointe sud de l'aiguille aimantée (planche 3, figure 23) ; parfois ils se prolongent jusqu'à leur point de réunion, formant ainsi le fragment d'une immense coupole lumineuse (planche 3, figure 24).

L'arc continue à monter vers le zénith ; il éprouve un mouvement ondulatoire dans sa lueur, c'est-à-dire que d'un instant à l'autre l'éclat de chaque rayon augmente successivement d'intensité. Cette espèce de courant lumineux se montre plusieurs fois de suite, et

bien plus fréquemment de l'ouest à l'est que dans le sens opposé; quelquefois, mais rarement, un mouvement rétrograde a lieu immédiatement après le premier.

L'arc offre un mouvement alternatif dans le sens horizontal, figurant les ondulations ou les plis d'un ruban ou d'un drapeau agité par le vent (planche 3, figure 25). Parfois un de ses pieds et même tous les deux abandonnent l'horizon; alors les plis deviennent plus nombreux, mieux prononcés, l'arc n'est plus qu'une longue bande de rayons qui se contourne, se sépare en plusieurs parties formant des courbes gracieuses (planche 3, figures 26 et 27), lesquelles se referment presque sur elles-mêmes, et offrent, n'importe dans quelle partie de la voûte céleste, ce qu'on a appelé jusqu'ici *couronne boréale*. La figure 21 planche 2 offre également la disposition des arcs d'une aurore boréale. Alors l'éclat des rayons varie subitement d'intensité et dépasse celui d'étoiles de première grandeur; ces rayons dardent avec rapidité; les courbes se forment et se déroulent, comme les plis et replis d'un serpent, puis les rayons se colorent : la base est rouge, le milieu vert, le reste conserve sa teinte lumineuse jaune claire. Ces couleurs restent toujours sans exception dans ces positions respectives; elles sont d'une admirable transparence; le rouge approche de la teinte sang clair; le vert, de celle d'un émeraude pâle. L'éclat diminue, les couleurs disparaissent, tout s'éteint subitement ou s'affaiblit peu à peu. Des fragments d'arc reparaissent, l'arc se reforme lui-même, continue son mouvement ascensionnel et approche du zénith; les rayons, par l'effet de la perspective, deviennent de plus en plus courts; on peut juger de l'épaisseur de l'arc, qui offre alors parfois une large zone de rayons parallèles; puis le sommet de l'arc atteint le zénith magnétique, point désigné par la pointe sud de l'aiguille d'inclinaison; alors les rayons sont vus par leurs pieds: s'ils se colorent dans ce moment, ils montrent une large bande rouge à travers laquelle on distingue les nuances vertes qui leur sont supérieures.

Pendant que ces effets se produisent, de nouveaux arcs se présentent à l'horizon, commençant d'une manière diffuse ou avec les rayons tout formés et très-vifs. On en a compté jusqu'à neuf appuyés sur la terre, et rappelant par leur disposition ces toiles cintrées qui vont d'une coulisse à l'autre et figurent le ciel de nos scènes théâtrales.

Si l'on pense que tous les rayons précédemment mentionnés dardent souvent avec vivacité, variant continuellement et subite-

ment dans leur longueur et dans leur éclat, que de belles teintes rouges et vertes les colorent par intervalles, que des mouvements ondulatoires ont lieu comme ceux qui sont produits dans une étoffe légère; que les courants lumineux se succèdent, enfin que la voûte céleste tout entière offre une immense et magnifique coupole étincelante, dominant un sol couvert de neige qui lui-même sert de cadre éblouissant à une mer calme et noire comme un lac d'asphalte, on n'aura encore qu'une idée très-imparfaite de l'admirable spectacle qui s'offre alors à l'observateur et qu'il faut renoncer à décrire. Tel est le langage des membres de la commission scientifique.

La couronne ne dure que quelques minutes; elle se forme quelquefois instantanément sans aucun arc préalable. Rarement il y en a plus de deux dans la même nuit, et bien des aurores en sont privées.

La couronne s'affaiblit, tout le phénomène est au sud du zénith, formant des arcs plus pâles et qui disparaissent généralement avant d'avoir atteint l'horizon sud. L'aurore perd de son intensité; des faisceaux de rayons, des bandes, des fragments d'arc paraissent et disparaissent par intervalle; puis les rayons deviennent de plus en plus diffus. Des effets secondaires plus ou moins remarquables se produisent dans cette période, tels que des plaques lumineuses, des lueurs vagues, puis des mouvements irréguliers appelés mouvements de palpitation qui se présentent à la fin de l'aurore. La lueur crépusculaire arrive alors peu à peu, et le phénomène, s'affaiblissant graduellement, cesse d'être visible.

Distance de l'aurore. On a cherché à mesurer la hauteur de l'aurore au-dessus de la terre, en déterminant par la méthode des parallaxes la hauteur angulaire des diverses parties d'un arc, d'une couronne ou des points remarquables aperçus à la fois dans différents pays. Tantôt on a trouvé que le phénomène se passait à plus de 200 kilomètres au-dessus du sol, tantôt à 100 kilomètres, et en général à la limite de notre atmosphère.

L'agitation des jets de lumière, le mouvement des arcs, la fluctuation continuelle de la matière des aurores, qui se replie sur elle-même, se déplie comme une matière floconneuse agitée par un vent léger; tous ces effets semblent donner de la vraisemblance à l'opinion généralement accréditée dans les régions septentrionales, que les aurores boréales font quelquefois entendre un bruissement plus ou moins fort. M. Biot, pendant son séjour aux îles

Shetland, a recueilli de la part des habitants des témoignages unanimes de ce fait, dont il n'a pas été témoin. Les membres de la commission scientifique ont reçu de semblables témoignages de la part des habitants de Bossekop; mais jamais eux-mêmes ils n'ont entendu de bruit.

Fréquence de l'aurore boréale. La commission scientifique de 1838, qui a observé 143 aurores boréales en 206 jours, a émis l'opinion que, dans les régions polaires, les nuits sans aurore boréale sont des nuits exceptionnelles. L'apparition du météore a quelquefois lieu dès que la nuit commence; cependant il ne faut pas croire que l'aurore soit toujours fixée au-dessus de l'horizon; elle ne se montre quelquefois qu'à une heure assez avancée de la nuit. Ordinairement, cependant, à mesure que la clarté crépusculaire diminue, l'aurore se présente à l'observateur avec tous les signes capables d'indiquer qu'elle existait avant son apparition. Si l'on joint à cette circonstance la disparition de l'aurore souvent retardée jusqu'à l'arrivée du jour, il est permis de croire que le météore existe souvent en plein jour.

La succession non interrompue du météore n'empêche pas qu'il ne reste soumis aux lois de la période diurne; ainsi l'apparition des arcs, celle des rayons ou des plaques, l'heure où les rayons se colorent et atteignent leur maximum d'éclat, ne sont point réglées au hasard. La période diurne des phases successives est très-évidente, ainsi que les perturbations magnétiques qui les accompagnent. L'aurore commence par des arcs ou des rayons; quelques aurores n'offrent que des rayons sans aucune apparence d'arc pendant toute la durée de la nuit; d'autres n'offrent que des arcs sans aucune trace de rayons. Les rayons colorés, partie la plus brillante du météore, agissant si puissamment sur l'aiguille aimantée, paraissent en général vers 10 heures du soir, et leur apparition est rare après 4 heures du matin. Les plaques aurorales, au contraire, dominent pendant la seconde partie de la nuit; enfin les mouvements de palpitation appartiennent à la période de déclin.

M. Bravais a trouvé pour les époques moyennes les nombres suivants :

Première apparition	des arcs...........	7	heures	52′	du soir.
Id.	des rayons.........	8	»	26′	»
Id.	des plaques........	11	»	18′	»
Id.	des lueurs vagues...	3	»	32′	du matin.

Ces nombres ne sont que des moyennes, car, dans le Nord, le phé-

nomène n'est soumis à aucune apparition rigoureusement régulière.

Si dans les régions polaires les aurores sont fréquentes, et même ont lieu tous les jours, dans les latitudes moyennes elles sont plus rares, et ne se montrent que lorsque, dans les régions polaires, elles ont une certaine étendue. Quelquefois ce météore a une étendue considérable, et, si l'on fait attention qu'il peut s'en montrer vers les deux pôles de la terre, on voit que ce phènomène peut se manifester sur une grande partie du globe. Mairan, qui a rapporté dans son Traité de l'aurore boréale les exemples d'aurores dont il a pu avoir connaissance jusqu'en 1731, et qui a suivi lui-même les aurores parues pendant 16 ans (de 1716 à 1731), en a déduit les conséquences suivantes : dans les latitudes moyennes, les aurores boréales sont plus fréquentes en hiver qu'en été. Quoique ce phénomène soit variable, cependant il ne s'est pas montré toujours de la même manière : ainsi, vers 1724, il y a eu annuellement fort peu d'aurores, deux seulement ; en 1728 elles ont été très-fréquentes ; mais jamais on n'en avait tant vu que dans le mois d'octobre de 1731, où il y a eu en moyenne une aurore sur trois jours. Dans nos contrées, en moyenne, on compte annuellement dix aurores boréales.

Bien des théories ont été mises en avant pour expliquer les aurores boréales.

Halley a supposé qu'elles étaient dues à des tourbillons magnétiques traversant la terre avec une excessive vitesse du sud au nord, et pouvant devenir lumineux par eux-mêmes ou par leur contact avec les substances terrestres qu'ils rencontrent.

Mairan émit l'opinion qu'il existe autour du soleil une espèce de matière lumineuse d'une ténacité extrême, et qu'une l'aurore boréale n'était qu'une portion de cette vapeur, ou plutôt une portion de l'atmosphère solaire que la terre rencontrait sur sa route et emportait avec elle dans l'espace.

Cette théorie, présentée avec talent, fut adoptée par les savants jusqu'en 1740, époque où Celsius et Hiorter découvrirent que les aiguilles aimantées éprouvaient une agitation extraordinaire lors de l'apparition des aurores. En rapprochant ce fait des effets lumineux de l'aurore boréale, qui sont semblables à ceux produits par l'électricité dans le vide, on supposa que l'électricité devait jouer un certain rôle dans la production du phénomène. Mais il ne suffisait pas de trouver une identité entre la lumière électrique et celle des aurores, il fallait encore démontrer l'existence d'une

quantité suffisante d'électricité dans l'atmosphère; c'est ce qui fut fait plus tard par Franklin et d'autres physiciens.

Dalton supposa que, le phénomène se passant à 150 milles d'élévation au-dessus de la surface de la terre, devait être dû à des effets électriques lumineux produits dans un air plus ou moins raréfié; il émit l'opinion que les rayons de l'aurore devaient avoir une origine ferrugineuse à raison de l'action exercée sur eux par le magnétisme de la terre.

M. Kaemtz rattache les aurores boréales à des effets par induction se manifestant dans l'atmosphère, et produits par des changements dans l'intensité magnétique du globe, changements dus aux variations de température ou à tout autre motif. Cette hypothèse est bien difficile à admettre, car on ne voit pas comment ces effets peuvent se manifester dans des corps non conducteurs de l'électricité.

Aucune hypothèse ne rend compte jusqu'ici d'une manière satisfaisante des faits observés. On ne peut s'empêcher toutefois de reconnaître que les rayons ou colonnes des aurores polaires obéissant à l'action du magnétisme terrestre ont de l'analogie avec ces jets lumineux produits dans l'expérience de Davy, lorsqu'on fait passer dans le vide, entre deux pointes de charbon, la décharge d'une forte batterie voltaïque. Il pourrait donc se faire que les rayons lumineux de l'aurore fussent des traînées de matières gazeuses transportées par l'électricité et capables de prendre toutes les formes, mais avec cette condition toutefois, que les recompositions électriques se fissent perpendiculairement à l'aiguille d'inclinaison. Comment seraient produites ces espèces de courants électriques? Il y a tant de moyens de mettre en mouvement l'électricité, qu'il peut très-bien se faire que la nature, dans cette circonstance, en ait à sa disposition qui nous soient inconnus.

DE L'ORIGINE DE L'ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE.

Il reste à indiquer, en terminant le livre cinquième, quelles sont les hypothèses qui ont été émises pour expliquer la production de

l'électricité atmosphérique. Nous avons vu que la terre et l'atmosphère sont ordinairement dans deux états électriques différents, la terre possédant un excès d'électricité négative, l'air un excès d'électricité positive; ainsi que nous l'avons déjà dit page 393, cet état de choses peut résulter encore de ce que la terre et l'atmosphère sont toutes deux électrisées de la même manière, mais à des degrés différents; les probabilités toutefois sont en faveur de la première hypothèse. Quoi qu'il en soit, voyons quelles sont les causes auxquelles on peut rapporter cette distribution d'électricité.

L'évaporation qui a lieu constamment à la surface de la terre ne peut pas être invoquée, l'évaporation pure et simple de l'eau dans des vases de métal non attaquable ne produisant pas d'électricité; mais il s'en dégage toutes les fois que l'évaporation est accompagnée d'une réaction chimique ou que le composé tenu en dissolution se déshydrate; c'est là une source connue, mais qui n'est pas suffisante pour rendre compte de l'énorme quantité d'électricité répartie dans l'air et dans la terre.

L'électricité que la vapeur accuse près des cascades, et qui est négative, provient probablement de la terre, ou bien elle est résultat d'un effet d'influence analogue à celui que l'on observe quand un corps conducteur s'élève ou s'abaisse verticalement dans l'air.

Les vapeurs qui s'élèvent du sol et celles qui lui sont transmises par l'air doivent apporter, les unes de l'électricité négative à l'air, les autres de l'électricité positive à la terre : les vapeurs ne servent alors que de véhicules. Les réactions chimiques sans nombre qui ont lieu dans l'intérieur des corps organisés ne sauraient être invoquées non plus, attendu que, ces réactions s'opérant le jour et la nuit dans des directions contraires, l'électricité devenue libre doit changer de signe.

On a supposé que la distribution de la chaleur dans l'atmosphère et dans la terre était la cause des effets électriques produits, et que l'inégale température des couches terrestres, depuis la surface du globe jusqu'à la limite de l'atmosphère, et même depuis le centre de la terre jusqu'aux dernières couches gazeuses, maintient, en dehors des variations accidentelles, l'équilibre de l'électricité atmosphérique (Becquerel).

Les expériences suivantes ont permis de faire cette hypothèse (voir pages 153 et suivantes) : lorsque la chaleur se propage inégalement dans un fil ou une masse homogène de métal, il y a trouble dans l'équilibre des forces électriques; les portions qui s'échauffent

le plus prennent l'électricité négative, et celles qui s'échauffent le moins l'électricité positive. Il en est encore de même au contact de deux parties d'un même fil, inégalement échauffées.

L'atmosphère se trouve précisément dans le même cas que les masses et les fils métalliques : la température des couches d'air va en diminuant depuis la surface de la terre jusqu'aux limites de l'atmosphère; en effet, la température moyenne étant de 27°,50 à la surface de la terre sous les tropiques, la température des dernières couches atmosphériques est au moins de — 60°; dans les régions tempérées, la différence entre ces deux températures extrêmes est moins considérable. En admettant que les effets électriques produits dans les substances métalliques par l'inégale distribution de la chaleur aient lieu également dans des masses gazeuses et les corps mauvais conducteurs, les parties supérieures de l'atmosphère doivent être positives, et les régions les plus inférieures ou le sol négatif dans cette hypothèse. Des effets analogues auraient lieu aussi dans le globe, et rendraient le centre de la terre négatif.

Si des observations ultérieures confirment cette manière de voir et prouvent que la distribution inégale de la chaleur dans l'atmosphère est la cause première de l'électricité atmosphérique, alors on pourrait peut-être concevoir comment les régions polaires, où les différences de température sont moins considérables, servent de lieux de réunion aux électricités dégagées sur le reste de la terre, et donnent naissance aux aurores boréales et australes.

FIN DU PREMIER VOLUME.

TROMBES.

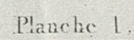


Planche 1.

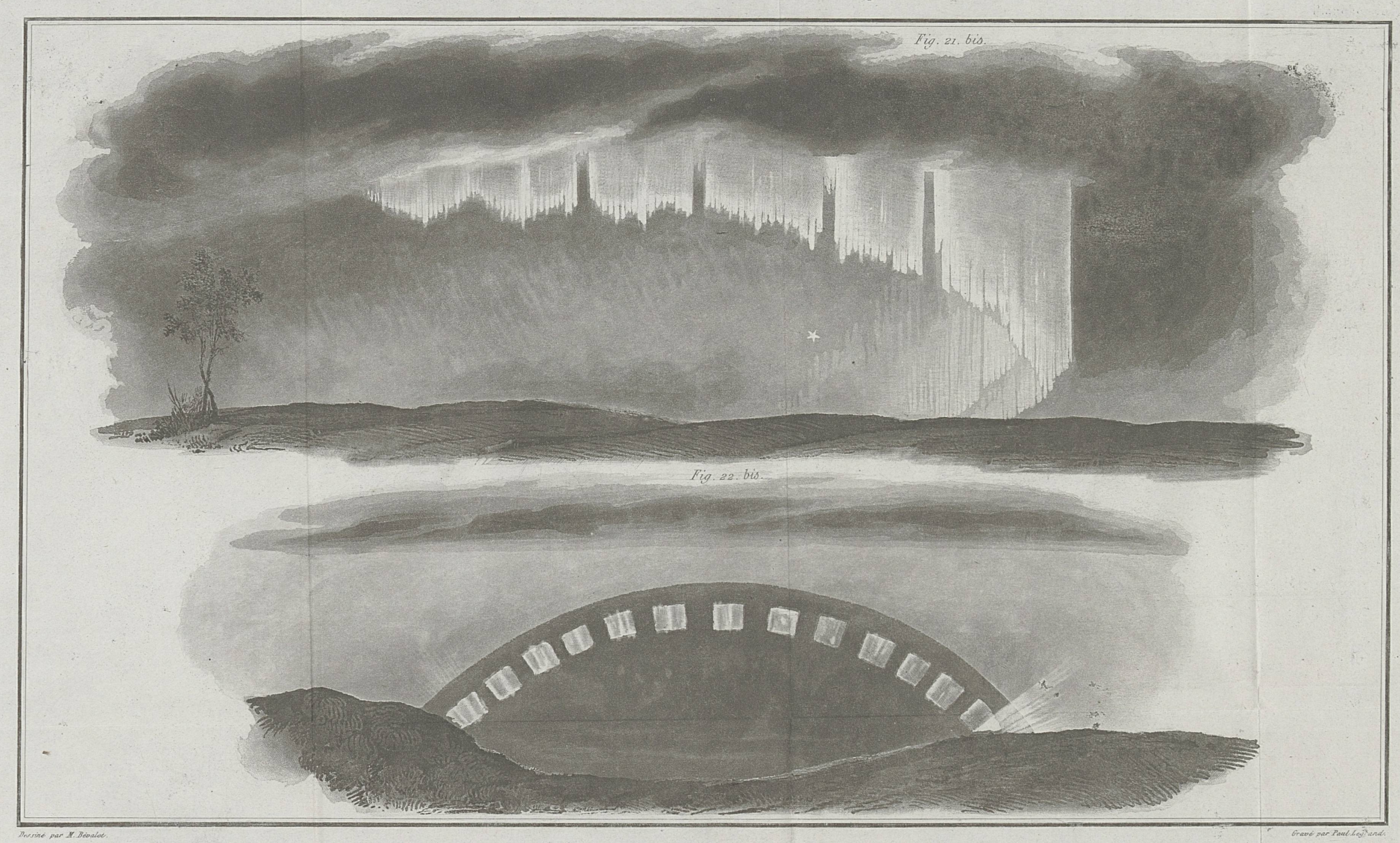
Fig. 20.

Fig. 21.

Dessiné par M. Bevalet.

Gravé par Paul Legrand.

AURORE BORÉALE OBSERVÉE A BOSSECOP, le 9 Janvier 1834.



Dessiné par M. Bévalet. *Gravé par Paul Legrand.*

AURORES BORÉALES OBSERVÉES A BOSSECOP.

Planche III.



Dessiné par M. Bévalet. *Gravé par Paul Legrand.*

TABLE DES MATIÈRES.

LIVRE I[er].

ÉLECTRICITÉ STATIQUE. PHÉNOMÈNES GÉNÉRAUX.

LIVRE II.

ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE. PHÉNOMÈNES GÉNÉRAUX.

LIVRE III.

CAUSES DU DÉGAGEMENT DE L'ÉLECTRICITÉ.

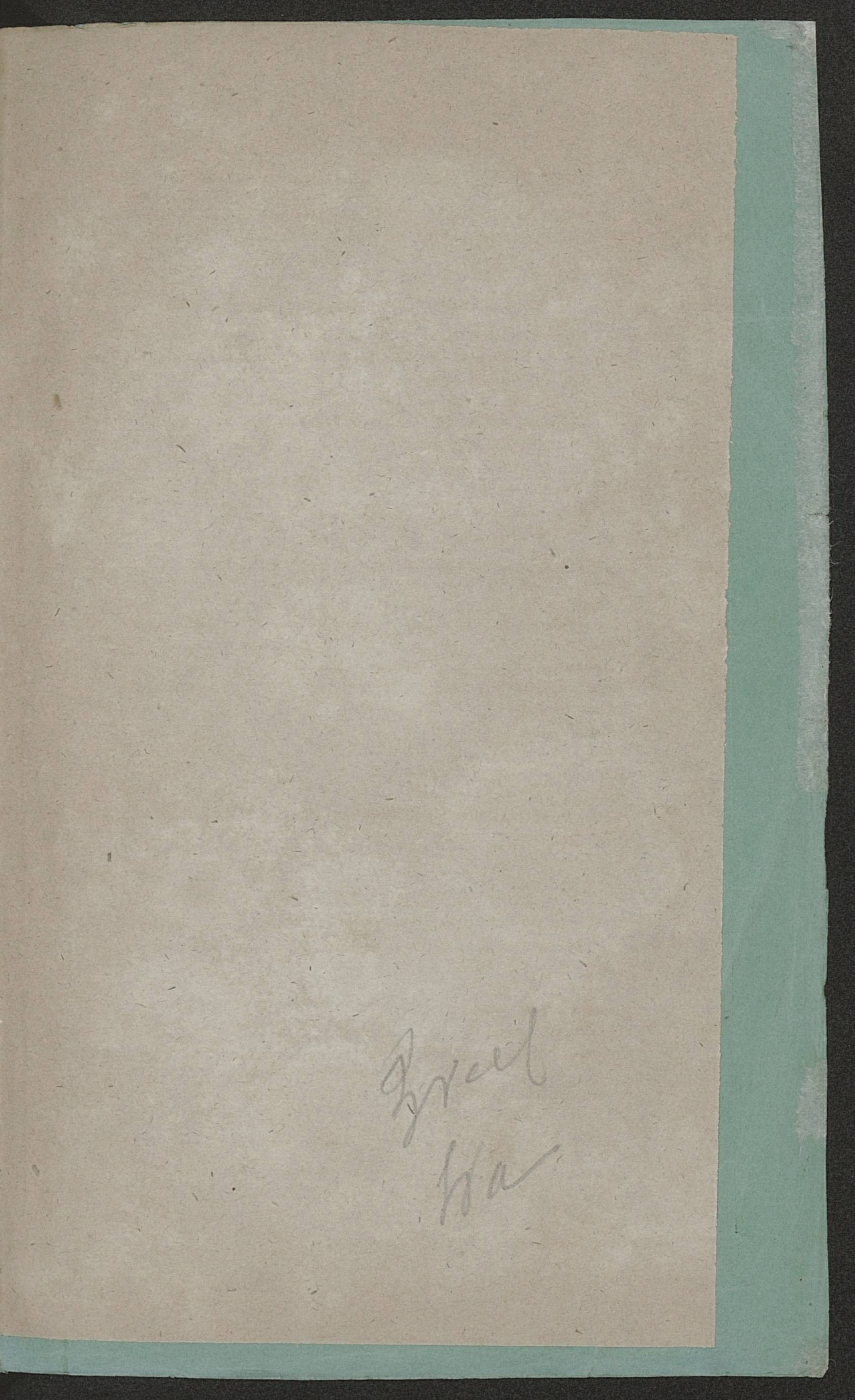
LIVRE IV.

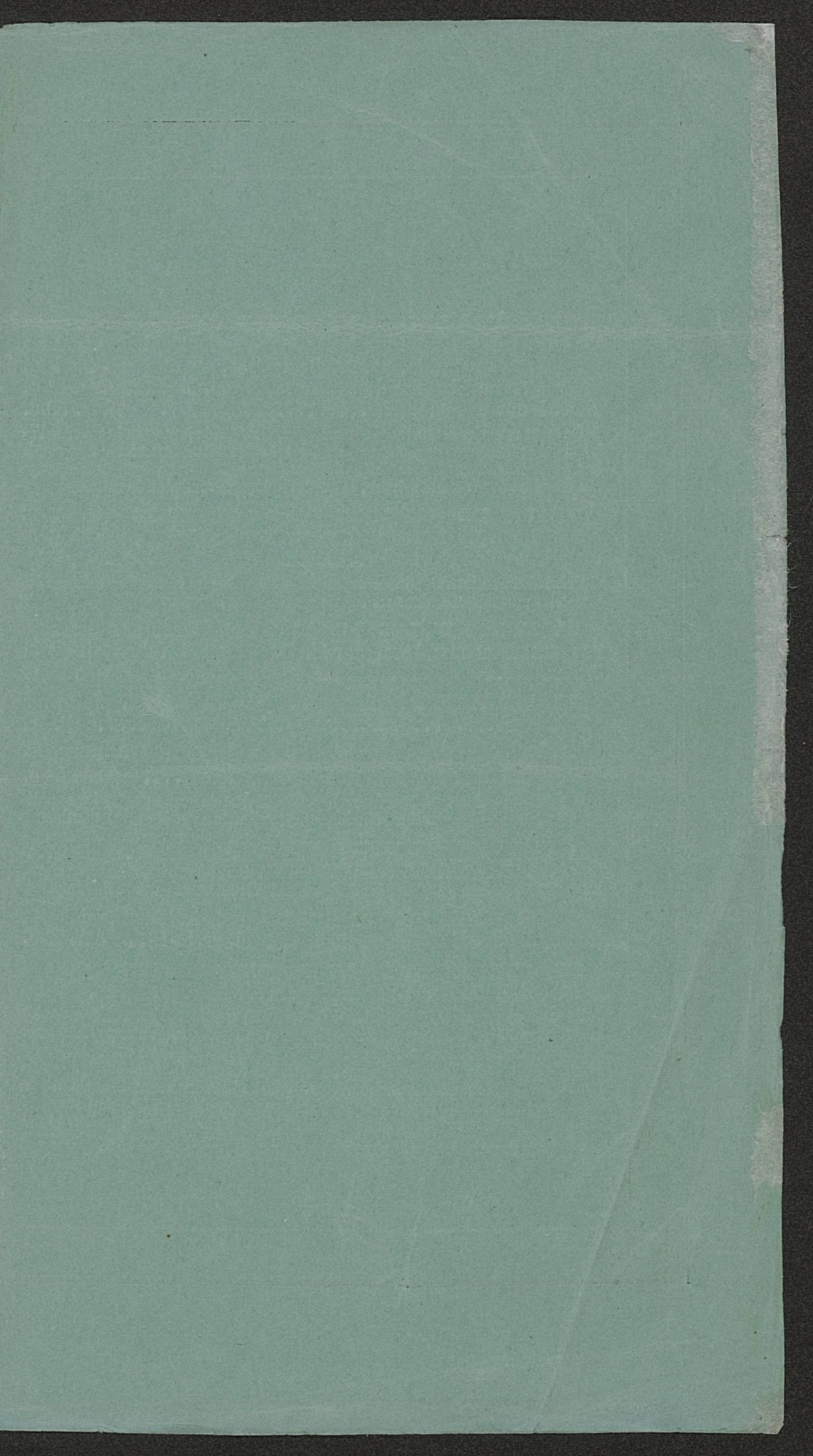
EFFETS DUS A L'ÉLECTRICITÉ.

LIVRE V.

ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE.

FIN DE LA TABLE.








Paris. — Typographie de Firmin Didot frères, rue Jacob, 56




inches

centimeters

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11 (A)	12	13	14	15
L*	39.12	65.43	49.87	44.26	55.56	70.82	63.51	39.92	52.24	97.06	92.02	87.34	82.14	72.06	62.15
a*	13.24	18.11	-4.34	-13.80	9.82	-33.43	34.26	11.81	48.55	-0.40	-0.60	-0.75	-1.06	-1.19	-1.07
b*	15.07	18.72	-22.29	22.85	-24.49	-0.35	59.60	-46.07	18.51	1.13	0.23	0.21	0.43	0.28	0.19
Density →										0.04	0.09	0.15	0.22	0.36	0.51

	16 (M)	17	18 (B)	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
L*	49.25	38.62	28.86	16.19	8.29	3.44	31.41	72.46	72.95	29.37	54.91	43.96	82.74	52.79	50.87
a*	-0.16	-0.18	0.54	-0.05	-0.81	-0.23	20.98	-24.45	16.83	13.06	-38.91	52.00	3.45	50.88	-27.17
b*	0.01	-0.04	0.60	0.73	0.19	0.49	-19.43	55.93	68.80	-49.49	30.77	30.01	81.29	-12.72	-29.46
Density	0.75	0.98	1.24	1.67	2.04	2.42									

D50 Illuminant, 2 degree observer

Golden Thread

Colors by Munsell Color Services Lab

Don Williams

BECQUEREL
ET
ED. BECQUEREL



TRAITÉ
D'ÉLECTRICITÉ
ET
DE MAGNÉTISME.

TOME I.

LIBRAIRIE
DE FIRMIN DIDOT
FRÈRES

1855.

